

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Широкомасштабное антропогенное воздействие на природные экосистемы и биологические объекты особенно ощутимо в высокоурбанизированных промышленно развитых регионах. Техногенное загрязнение окружающей среды, сокращение естественных ресурсов биосферы, деградация лесов и зеленых насаждений, снижение генетического потенциала чувствительных видов или полное их исчезновение – далеко не полный перечень проблем, порождаемых неразумным природопользованием и внедрением в экономику недостаточно эффективных технологий. Экономические и технологические трудности на пути решения этих проблем в областях производства и потребления привели к необходимости эколого-гигиенической оценки существующего и прогнозируемого загрязнения среды и разработки комплексных методов улучшения ее качества. При этом оптимизация окружающей среды возможна только с учетом взаимовлияния всех составляющих ее элементов. Особое внимание уделяется биологическим способам охраны окружающей среды, которые включают эффективную очистку атмосферного воздуха и вод от вредных газов и пыли, поддержание их в естественном состоянии; формирование в условиях интенсивного задымления атмосферы и загрязнения вод растительных сообществ из газоустойчивых видов, создание шумового экрана, защищающего людей в местах работы, проживания и отдыха; интегральную индикацию качества атмосферного воздуха, воды и почвы.

Одна из актуальных проблем экологии, назревших в современный период в связи с ростом городов и образованием их крупных агломераций, – оптимизация внутригородской среды с целью улучшения условий жизни и отдыха населения. Промышленное и транспортное загрязнение воздушной среды и почв городов, усиление разнообразных антропогенных нагрузок на городские и пригородные лесопарки и парковые насаждения обусловили жесткий экологический режим в крупных промышленных центрах, с одной стороны, вредно влияющий на зеленые насаждения, а с другой – ухудшающий здоровье граждан и увеличивающий дискомфорт в городской среде обитания.

Загрязнение атмосферы токсическими газами делает все более актуальным поиск путей нейтрализации их пагубного действия, и в этом процессе важнейшая роль принадлежит городским зеленым насаждениям и естественным лесным массивам. Именно они, синтезируя органическое вещество, вовлекают

в метаболизм ингредиенты промышленных и автотранспортных отходов, в том числе ядовитые газы, и тем самым понижают их концентрацию в воздушной среде, улучшают микроклимат и санитарно-гигиенические характеристики воздуха.

Изучение механизмов нарушения метаболизма промышленными газами имеет важное значение для научного обоснования критериев качества воздуха и разработки ПДК газов для растений и биосферы, экологического нормирования, прогнозирования и оптимизации окружающей среды средствами озеленения.

Исследования, выполненные сотрудниками лаборатории в 2001–2005 гг. по заданию ГПОФИ «Природные комплексы-19», позволили раскрыть физиолого-биохимические механизмы комплексного и дифференцированного действия органических и неорганических поллютантов на устойчивость аборигенных и интродуцированных видов древесных растений, что является вкладом в развитие теоретических аспектов устойчивости растений к экстремальным абиотическим и техногенным экологическим факторам окружающей среды [6].

Впервые на основании эколого-физиологических исследований выделены группы устойчивых, среднеустойчивых и неустойчивых к формальдегиду и бенз(а)пирену аборигенных и интродуцированных древесных растений и установлена видовая специфичность ответных реакций растений на действие данных аэротехногенных поллютантов [2]. На основании проведенных исследований установлено, что бенз(а)пирен существенно влияет на метаболизм высших растений. Физиологический эффект бенз(а)пирена во многом определяется его концентрацией и временем воздействия [8]. По характеру ответной реакции высших растений можно судить об их газоустойчивости к бенз(а)пирену. Эти различия выявлены на видовом, анатомо-морфологическом и физиолого-биохимическом уровнях.

Влияние слабых концентраций бенз(а)пирена на уровне растения в условиях *in vitro* достоверно стимулирует удлинение междоузлий побегов; дальнейшее повышение его концентрации приводит к резкому торможению ростовых процессов, при этом общая тенденция снижения роста компенсируется увеличением числа активировавшихся пазушных почек [14].

Морфометрические исследования отдельных органов показали статистически достоверную корреляционную связь между толщиной листовой пластинки и концентрацией бенз(а)пирена. В условиях *in vitro* уменьшение толщины листовой пластинки происходит в основном за счет сокращения высоты губчатой паренхимы и уменьшения растяжения клеток как в длину, так и в высоту, в результате чего объем и поверхность клеток также снижаются [14].

На анатомическом уровне адаптивная реакция растений в техногенной среде с присутствием бенз(а)пирена у устойчивых видов выражается в изменении мезоструктуры листа, направленном на снижение проникновения токсиканта в мезофилл, что проявляется в уменьшении доли губчатой паренхимы в общем объеме мезофилла листа и увеличении коэффициента паренхимности [13].

У устойчивых видов под влиянием метаболических концентраций бенз(а)-пирена отмечаются более высокие значения активности пероксидазы и накопление фонда зеленых и желтых пигментов. Возрастание активности пероксидазы в клетках и тканях растений под воздействием экстремальных факторов может свидетельствовать как об активации свободных радикалов кислорода, негативно влияющих на клеточные мембраны и вызывающих их перекисление, так и о включении защитных механизмов, направленных на уменьшение концентрации вредных свободных радикалов в клетке и разрушение органических перекисей [15].

На основании полученных результатов дана характеристика 59 видам лиственных и 15 видам хвойных растений с точки зрения их устойчивости к классу полициклических ароматических углеводородов, представителем которых является бенз(а)пирен, что легло в основу разработки ассортимента аборигенных и интродуцированных деревьев и кустарников, рекомендуемых для озеленения промышленно-городских территорий и автомагистралей [2].

В спектре выбросов загрязняющих веществ воздушного бассейна Беларуси одним из приоритетных является хлористый водород, основным поставщиком которого служат Бобруйский завод шин и Солигорское ПО «Беларуськалий». До настоящего времени в Республике Беларусь и сопредельных государствах комплексных исследований по анализу фитотоксичности данного поллютанта на состояние древесно-кустарниковой растительности местной и мировой флоры не проводилось. В связи с этим решение научных задач, посвященных изучению влияния хлористого водорода на анатомо-морфологические и физиолого-биохимические характеристики ассимиляционного аппарата исследуемых растений, актуально и имеет высокую практическую значимость.

На основании эколого-физиологических исследований 119 видов листопадных и вечнозеленых древесных растений местной и мировой флоры установлена видоспецифичность ответных реакций растительных организмов на действие хлористого водорода. Выделены четыре группы растений, различающихся по чувствительности к действию хлористого водорода: 1 – высокоустойчивые, 2 – устойчивые, 3 – среднеустойчивые, 4 – чувствительные [2, 7, 10].

Один из эффективных механизмов адаптации растений к действию хлористого водорода – гибкая лабильная пигментная система. Устойчивые к HCl виды растений отличаются резистентностью фотосинтетических пигментов. Количественное содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, а также соотношение пулов зеленых и желтых пигментов у чувствительных видов после фумигации хлористым водородом существенно уменьшается по сравнению с контролем [7].

Воздействие хлористого водорода приводит к уменьшению содержания водорастворимых белков исследуемых растений. Содержание белков находится в прямой корреляционной связи с устойчивостью видов к HCl [3, 4].

Хлористый водород оказывает влияние на активность фермента пероксидазы аборигенных и интродуцированных древесных растений. Выявлено, что

наибольшее увеличение активности фермента характерно для среднеустойчивых видов. В листьях устойчивых растений активность данного энзима возрастает незначительно, а у неустойчивых видов снижается [1].

Выявлен ряд видов древесных растений, обладающих устойчивостью и ярко выраженной способностью к поглощению и нейтрализации хлористого водорода: боярышник черный, боярышник Эльвангера, ива белая шелковистая, девичий виноград пятилисточковый, липа маньчжурская, липа европейская разрезнолистная, клен ложноплатановый. Эти виды можно использовать в качестве фильтров в системе озеленения предприятий с преимущественными выбросами хлористого водорода. Установлено, что растения могут поглощать из воздуха хлористый водород и накапливать его в листьях, способствуя очистке приземного слоя воздуха от загрязнителей. Выделены три группы видов: с низким, средним и высоким уровнем поглощения хлористого водорода [2].

Устойчивость растений к хлористому водороду зависит от биологических особенностей анатомического строения листа. Установлено, что виды, обладающие большей толщиной листовой пластинки, эпидермиса и паренхимы, более толерантны по отношению к хлористому водороду [5].

Проведенные исследования дополняют систему знаний о газоустойчивости древесных растений к газообразным токсикантам. Полученные данные использованы в зеленом строительстве республики, при составлении ассортиментов аборигенных и интродуцированных древесных растений, перспективных для оптимизации окружающей среды средствами озеленения в зонах преимущественного загрязнения атмосферного воздуха хлористым водородом.

Многолетние исследования, проведенные по заданию ГПОФИ «Биологические ресурсы-53» «Эколого-физиологические исследования интродуцированных древесных растений при разработке и совершенствовании их ассортимента для зеленого строительства» в 2001–2005 гг., показали, что наряду с выявлением различных уровней загрязнения воздушной среды промышленными предприятиями и транспортом на основе фитоиндикации с лесопатологической точки зрения, основываясь на расчетах специальных индексов, современное санитарное состояние изученных древостоев на всех обследованных лесных насаждениях лесопарковой зоны г. Минска в целом удовлетворительное. Существует общая для всех объектов наблюдения тенденция к преимущественному появлению ослабленных деревьев в средних и подчиненных (III–IV) классах Крафта, сильноослабленных – в III–IV классах, отмирающих и сухостоя – в IV–V классах. В последнем случае это в основном тонкомер с диаметром меньше среднего для данного древостоя. Тем самым проявляется тесная связь процесса отпада с естественным самоизреживанием древостоя по причине промышленного и транспортного загрязнения окружающей среды. Полученные данные в отношении состояния данных лесов свидетельствуют о значительной интенсивности отпада как в хвойных, так и в лиственных древесных насаждениях в наиболее загрязненных зонах Минска (ур. «Степанка» и «Уручье») [6].

Результаты исследований показали, что средневозрастные насаждения характеризуются более высокой степенью устойчивости к абиотическим и биотическим факторам внешней среды, чем спелые. В последних отмечается более высокая степень болезней и повреждения вредителями.

В зоне рассеивания техногенных выбросов г. Минска имеет место незначительная дигрессия текущего прироста сосновых древостоев. Для переходных к средневозрастным и средневозрастных насаждений за последние 5 лет потери текущего прироста не превышают 11,0% общего объемного текущего прироста. В приспевающих сосновых насаждениях соответствующие потери достигли 18,5%. Временное снижение текущего прироста относительно контроля обусловлено усиленными выбросами  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$ , бенз(а)пиреном, предприятиями города и транспорта и не связано с метеорологическими условиями. Изучение состояния естественного возобновления, подлеска и живого напочвенного покрова в условиях влияния промышленного загрязнения показало, что исследованные насаждения переживают различные дигрессивно-демутационные стадии, трансформируясь в злаковые и разнотравно-злаковые ассоциации.

Установлено, что участие отдельных видовых популяций в сложении ценоза зависит не только от неоднородности условий среды, видовой структуры ценоза, но в значительной мере и от роли случайных (мелкозначущих и трудноопределяемых) факторов, причем их доля значительно увеличивается в условиях урбанизированной среды, сильно ограничивая применимость статистических методов анализа растительного покрова.

Характерная особенность изученных нами лесопарковых насаждений – широкое развитие в напочвенном покрове злаков и разнотравья. Установленная корреляционная структура напочвенного покрова – наглядный тому пример (центральные места занимают именно злаки, а разнотравье – дополняющий материал). Моховидные и кустарнички выпадают из состава фитоценозов. Такой «остепненный» характер не только видового состава, но и отношений между видами свидетельствует о наличии дигрессивно-демутационного направления сукцессионных процессов, обусловленного рекреационными и техногенными факторами.

Таким образом, получены новые данные об уровнях аккумуляции техногенных загрязнителей в городских зеленых насаждениях, тенденциях изменения продуцирования стволовой древесной массы в зависимости от величины техногенных нагрузок в связи с оценкой степени устойчивости древесных и кустарниковых пород в условиях урбанизированной среды Минска и определением путей ее улучшения посредством введения в практику зеленого строительства Беларуси наиболее устойчивых видов растений местной и мировой флоры.

В соответствии с Перечнем приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 512 от 17.05.2005 г., сотрудники лаборатории с января 2006 г. приступили

к реализации двух заданий: в рамках ГПОФИ «Природопользование-21» – «Биологический круговорот тяжелых металлов еловых экосистем, примыкающих к крупным промышленным центрам Беларуси и разработка прогнозных показателей уровня их накопления», ГПОФИ «Ресурсы растительного и животного мира-35» – «Устойчивость интродуцированных и аборигенных древесных растений городских зеленых насаждений и лесных фитоценозов к техногенным факторам среды».

Исследование влияния тяжелых металлов на хвойные растения позволяет выявить количество элементов, депонированное в древесине и надолго изъятые из биологического круговорота, степень накопления токсикантов в отдельных фракциях древостоя и, таким образом, определить пригодность вида для целей фиторемедиации.

В связи с этим на территории Минского леспаркхоза, Воложинского, Логойского, Минского, Молодечненского лесхозов и ГЛХУ «Красносельское» было заложено 26 пробных площадей (ПП).

Известно, что любые растительные комплексы, в том числе еловые, формирующиеся вблизи крупных городов и промышленных центров, испытывают определенное антропогенное воздействие, влияющее на их рост и развитие. Принято считать, что это влияние по мере удаления от границ источников загрязнения уменьшается, и состояние растительных объектов не претерпевает существенных изменений в ходе биопродукционного процесса.

Влияние такого крупного промышленного центра, как Минск, на еловые леса проявляется на разном уровне организации экосистемы. В структуре древостоя по мере удаления от источника загрязнения возрастает доля ели. Например, в восточном направлении это выглядит так: Уручье (8Е2С), Колодищи (9Е1С) и Городище (10Е). По мере удаления от Минска возрастает и полнота древостоя. Для использованного в качестве примера восточного направления величина показателя располагается следующим образом: 1,09 – Уручье; 1,18 – Колодищи; 1,13 – Городище. Возобновление древостоя под действием загрязнения прекращается, в составе подроста ель вытесняется мелколиственными породами. Запас стволовой древесины и фракционный состав надземной фитомассы имеют более высокие значения на значительном удалении от промышленного центра относительно ближнего пригорода. В составе фитомассы ельников сокращается доля многолетней хвои, так как загрязнение сокращает продолжительность ее жизни [12].

Распределение фитомассы по фракционному составу показало, что основная ее часть (71,8%) приходится на стволовую древесину, а доля коры, ветвей крупных и мелких, хвои многолетней и однолетней, побегов однолетних составляет в среднем 7,5; 7,1; 3,6; 8,2; 1,5 и 0,3% соответственно. Исключение – модельные деревья на ПП 7 и 9, где фитомасса некоторых фракций (ветви крупные и мелкие, хвоя многолетняя) превышала указанные средние процентные величины.

Полученные весовые показатели отдельных компонентов модельных деревьев послужили основой для перерасчета их сырораствующей фитомассы на

стандартную единицу площади (1 га) путем умножения на количество произрастающих здесь елей (без учета сухостойных деревьев). Накопление биомассы определенными структурными частями еловых древостоев на эту единицу площади вполне коррелирует с данными модельных деревьев, увеличивая их биомассу в абсолютных показателях в зависимости от количества деревьев на 1 га.

Помимо стволовой древесины на деревьях выделяют отдельные фракции, включающие ветви, молодые побеги и хвою разных лет. Сравнив массу однолетней и многолетней хвои, крупных и мелких ветвей на пробных площадях, расположенных на разном удалении от черты города, выявлена тенденция к повышению каждого компонента по мере удаления от Минска. Выразив долю каждой фракции в процентах, можно проследить характер изменения не только отдельных составляющих наземной фитомассы, но и их соотношения на разном удалении от промышленного центра. В структуре наземной фитомассы ельников по мере удаления от города снижалась доля крупных ветвей и повышался вклад в суммарную массу многолетней хвои.

Снижение запасов первичной продукции может быть следствием скрытых и видимых нарушений фотоассимиляционного аппарата, отражающихся в снижении размеров, площади фотосинтезирующей поверхности и содержании пигментов. По мере удаления пробных площадей от центра Минска наблюдалось увеличение площади хвои. Так, в восточном направлении величина фотосинтезирующей поверхности повышалась от 24–43 мм<sup>2</sup> (диапазон размеров разного возраста) на ПП 4 до 47–67 мм<sup>2</sup> на ПП 6. Наиболее мелкая хвоя выявлена на елях южного пригорода, по мере удаления от центра города площадь поверхности хвои составляла 18–35 мм<sup>2</sup> на ПП 22, 28–45 мм<sup>2</sup> на ПП 10, 35–59 мм<sup>2</sup> на ПП 2. Такая же закономерность прослеживалась и на елях, растущих в юго-западном пригороде Минска (ПП 19 – ПП18 – ПП20).

Концентрация хлорофилла в хвое в ответ на воздействие аэротехногенных поллютантов может повышаться или понижаться в зависимости от интенсивности действия фактора [9], поэтому только по концентрации пигмента сложно оценить степень негативного действия. Более надежный показатель степени загрязнения – структура пигментов (соотношение хлорофиллов *a* и *b*). В условиях техногенного влияния соотношение форм хлорофилла *a/b* менялось в зависимости от интенсивности воздействия. В общем количестве пигментов возросла доля хлорофилла *a*, соотношение хлорофилла и каротиноидов сместилось в сторону хлорофилла. Смещение соотношения хлорофиллов *a/b* в пользу хлорофилла *a* отмечено при удалении от центра города на север (ПП 1 – ПП 7) и на восток (ПП 4 и ПП 6). Существенных отличий от контроля и различий между пробными площадями у елей юго-западного направления (ПП 18, 19, 20) по данному показателю не найдено.

В зависимости от расположения промышленных предприятий и местоположения ельников относительно розы ветров в еловой фитомассе изменяется содержание тех или иных токсикантов. В северном и северо-западном пригороде отмечаются наиболее высокие концентрации кобальта и меди в еловой

фитомассе; в южном и юго-восточном направлении – хрома, цинка и свинца; южном и юго-западном направлении – никеля. Стронций, олово и кадмий превышали естественный уровень накопления в растительности, однако отсутствие связи содержания элементов с расстоянием от промышленного центра и направлением розы ветров свидетельствует об ином источнике загрязнения.

Содержание элементов в отдельных фракциях фитомассы различалось в зависимости от местонахождения ПП, части растения и вида металла. Так, наиболее высокие концентрации свинца отмечаются в центре города (ЦБС НАН Беларуси), северо-восточном и юго-восточном пригороде непосредственно за кольцевой дорогой. Наиболее высокие концентрации никеля выявлены непосредственно за кольцевой дорогой (в ближнем пригороде Минска) в западном и юго-западном направлении. Концентрация токсикантов повышена в активно растущей части растения – однолетних побегах и мелких ветках. При этом невысокие концентрации тяжелых металлов в почве (15–45% от уровня ПДК) положительно сказываются на текущем радиальном приросте стволовой древесины, что в конечном итоге приводит к активизации биопродукционных процессов древостоя еловых экосистем.

Данные лабораторного опыта (внесение в питательную смесь разово (5 ПДК) и постепенно (5 раз по 1 ПДК) свинца показали, что от характера поступления свинца зависит величина и структура фитомассы елей, а также степень аккумуляции элемента растением. Разовое загрязнение среды свинцом в большой концентрации приводит к повышению фитомассы в основном за счет массы корней, где накапливается большая часть свинца. При постоянном слабом поступлении поллютанта у растений активизируются механизмы адаптации. Вероятно, повышается доля экссудатов корней, блокирующих поступление металла в растение, в результате чего концентрация свинца во всех компонентах фитомассы ниже, чем при разовом внесении металла, но при этом снижается и масса самих структурных компонентов растений. Данные вегетационного опыта свидетельствуют о выраженных ремедирующих свойствах ели европейской.

Уровень накопления тяжелых металлов в почве определялся также типологическими особенностями изучаемых насаждений.

**Ельники кисличные.** На долю этих насаждений приходится 42,3% (11 ПП) всех обследованных объектов. Местоположение ельников кисличных приходится на северо-западный (6 шт.) и юго-западный сектор (за исключением ПП 25) относительно г. Минска. Анализ полученных данных показал, что средняя суммарная концентрация всех элементов в почвенных горизонтах определялась величиной в 23,3 мг/кг, и незначительно различалась в зависимости от месторасположения насаждения по отношению к сторонам света (23,7 мг/кг в северо-западном и 22,73 мг/кг в юго-западном секторах). В то же время накопление конкретных тяжелых металлов в почве под ельниками кисличными в зависимости от их местопроизрастания несколько иное. Из всех рассматриваемых элементов по четырем (хром, цинк, кадмий, свинец) отмечена тенден-



ция к повышенному накоплению их в северо-западном секторе по отношению к юго-западному. Так, среднее содержание хрома в почве по направлению «север – юг» уменьшается с 34,2 мг/кг до 27,8 мг/кг, или на 10,4%; цинка и свинца – соответственно с 39,2 до 33,2 мг/кг (на 8,4%) и с 21,2 до 18,9 мг/кг (на 5,8%). Наиболее значимое снижение наблюдается по кадмию, содержание которого в почве в юго-западном секторе уменьшилось на 25,0% (с 0,227 до 0,136 мг/га). Что касается никеля и меди, то здесь отмечается некоторая тенденция к увеличению их аккумуляции в почвенной толще на юго-западном направлении в среднем на 5,8 и 5,6% (соответственно с 24,8 до 27,8 мг/кг и с 25,2 до 47,2 мг/кг).

При этом в зависимости от их санитарного состояния среднее суммарное содержание рассматриваемых элементов в почвенных горизонтах по всем объектам составило 23,3 мг/кг. И если здоровых насаждениях этот показатель определялся величиной 20,9 мг/кг, в ослабленных – 21,8, то в сильно ослабленных – 25,1 мг/кг. Очевидна тенденция к увеличению содержания этих элементов в почве под ельниками кисличными, в древостое которых увеличивается количество сильно ослабленных, отмирающих и сухостойных деревьев. Такая же закономерность наблюдается и в отношении конкретных элементов. Так, средняя суммарная аккумуляция хрома в почвенных горизонтах под здоровыми насаждениями составила 27,8 мг/кг, увеличиваясь до 32,0–36,1 мг/кг в ослабленных и сильно ослабленных насаждениях. Среднее содержание никеля, меди, цинка, кадмия и свинца в данных ельниках определялось величинами от 24,6 до 29,7 мг/кг; от 21,6 до 22,6 мг/кг; от 34,8 до 41,6 мг/кг; от 0,16 до 0,20 мг/кг и от 16,3 до 22,0 мг/кг соответственно. Анализ полученных результатов показал, что в здоровых ельниках кисличных накопление тяжелых металлов в генетических горизонтах почвы имеет четкую тенденцию снижения их показателей в зависимости от глубины отбора образцов. В ослабленных и особенно в сильно ослабленных древостоях максимальные средние значения накопления элементов в почве приходятся на перегнойно-аккумулятивный горизонт, а не на горизонт  $A_0$ . Максимальные значения содержания тяжелых металлов в почвах под сильно ослабленными насаждениями связано с количеством деревьев, которых на данных объектах в 1,5–2,0 раза больше по сравнению со здоровыми и ослабленными ельниками, а также более густым подлеском. Это способствует большему поступлению органики в виде хвои и листьев под полог насаждения, что в конечном счете отражается и на количественных показателях накопления тяжелых металлов в почве.

**Ельники мшистые.** Данные насаждения представлены 9 ПП, что составляет 34,7% от общего количества объектов. Если ельники кисличные в основном расположились на западном направлении от г. Минска, то мшистые – на восточном (за исключением ПП 23 и 27). Сравнивая содержание элементов в почве под этими ельниками, отметим, что половина металлов (никель, медь, цинк) имеет незначительное (с 3,4 до 7,2%) увеличение их в почвогрунтах на восточном направлении. Вторая половина металлов (хром, кадмий, свинец) имеет

преобладание на западе в плане увеличения содержания их в почве на 3,6; 1,6 и 8,4% соответственно.

Расположение ельников мшистых в северо-восточном и юго-восточном секторах в некоторой степени отразилось и на содержании тяжелых металлов в почве. Анализ полученных данных показал, что на юго-восточном направлении отмечено увеличение содержания их в почве по сравнению с северо-востоком в среднем на 5,8%. Рассматривая конкретно накопление элементов в почвенной толще отметим, что наибольшее различие наблюдается по цинку, средняя суммарная величина которого увеличилась с 35,7 мг/кг (северо-восточный сектор) до 42,4 мг/кг (юго-восточный сектор), что составляет 8,6%. Остальные тяжелые металлы (помимо свинца, величина содержания которого была равной в этих секторах) имели амплитуду колебания соответственно по никелю – от 26,5 до 29,7 мг/кг (5,8%), по хрому – от 28,2 до 31,1 мг/кг (4,8%), по меди – от 26,4 до 28,5 мг/кг (3,8%), по кадмию – от 0,142 до 0,161 мг/кг (6,2%).

Если в почвах под ельниками кисличными наблюдалась тенденция увеличения содержания металлов от здоровых до ослабленных и сильно ослабленных еловых древостоев, то в ельниках мшистых такой закономерности не отмечено. Здесь средняя аккумуляция их в почве определялась величинами 24,4 мг/кг (здоровые насаждения) и 23,6 мг/кг (ослабленные насаждения). В то же время отметим, что в почвах под здоровыми ельниками мшистыми среднее суммарное содержание в почвах элементов на 7,8% больше, чем в ельниках кисличных (24,4 и 20,9 мг/кг соответственно). Такая же картина наблюдается и по ослабленным насаждениям, где эти показатели определялись величинами в 23,6 и 21,8 мг/кг (увеличение на 4,0%). Такая закономерность наблюдается и в накоплении конкретных тяжелых металлов. Так, среднее содержание в почве под здоровыми ельниками мшистыми хрома и меди увеличилось на 11,7% по сравнению с таковым под ельниками кисличными.

**Ельники черничные.** Данные насаждения представлены тремя пробными площадями, расположенными в юго-западном и северо-восточном секторах обследованной территории. Анализ полученных результатов по содержанию тяжелых металлов в почвенных горизонтах показал четкую тенденцию снижения их с глубиной. Если в мшистых ельниках максимальные значения накопления элементов приходились на перегнойно-аккумулятивный горизонт, то в черничных – на горизонт  $A_0$ . Ельники черничные, согласно расчетам, относятся к категории «ослабленных». Сравнивая суммарное накопление тяжелых металлов в почвенной толще с аналогичными по санитарному состоянию в ельниках кисличных и мшистых отметим следующее. Среднее содержание их в почвенных горизонтах под рассматриваемым ельником составило 24,1 мг/кг, что на 0,8 и 2,3 мг/кг больше чем в ельниках мшистых и кисличных (соответственно 23,6 и 21,8 мг/кг). В ельнике черничном аккумуляция металлов в почве по сравнению с ельником мшистым остается на одинаковом уровне, за исключением хрома и меди, где отмечено незначительное (на 3,4 и 1,0%) их увеличение. Противоположная картина наблюдается при сравнении величин содержа-

ния тяжелых металлов с кисличным типом леса. Здесь отмечается снижение концентрации всех элементов в почвенной толще (за исключением хрома): на 7,4% – по никелю, на 5,0% – по меди, на 3,0 и 1,0% – по цинку и свинцу соответственно.

Сравнительная оценка уровня аккумуляции тяжелых металлов в почве под ельниками различной типологической структуры позволила расположить хвойные насаждения в порядке увеличения их аккумулирующей способности: ельники кисличные < ельники мшистые < ельники черничные. При этом определяющую роль в накоплении техногенных поллютантов в почве играет санитарное состояние древостоя. Выявлено увеличение концентрации тяжелых металлов в подстилке и перегнойно-аккумулятивном горизонте под пологом еловых насаждений в ряду: здоровые < ослабленные < сильно ослабленные. Для минимизации негативных последствий и исключения тяжелых металлов из биологического круговорота в хвойных лесных массивах следует проводить своевременные санитарные лесотехнические мероприятия по удалению сухостойных и ослабленных деревьев.

Установлена закономерность изменения химических показателей, прослеженная в восточном направлении от источника загрязнения, позволяет считать, что при снижении техногенной нагрузки в почве возрастает содержание азота и фосфора, степень насыщенности основаниями – факторы, блокирующие подвижность металлов в почве.

В результате выполненных исследований подготовлены карты-схемы степени отклонений от ПДК накопления тяжелых металлов (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) в корнеобитаемом слое почвы еловых насаждений, примыкающих к Минскому промышленному узлу.

Исследования отличаются выраженной научной новизной и имеют важное фундаментальное значение, поскольку дают новую научную информацию в раскрытии механизмов комплексного и дифференцированного действия неорганических поллютантов на устойчивость аборигенных древесных растений, что является вкладом в развитие теоретических аспектов устойчивости растений к экстремальным абиотическим и техногенным экологическим факторам окружающей среды.

Антропогенная трансформация природной среды – одна из острейших проблем современности. Особо в этом отношении выделяются подверженные интенсивному техногенному воздействию природно-растительные комплексы вдоль автомобильных дорог. Соседство с крупными автомагистралями ведет к ухудшению состояния деревьев, нарушениям в репродуктивной сфере, изменению химического состава фитомассы, лесной подстилки, почвы. Автомагистрали являются источником загрязнения, влияющим на свойства эдафотопы в части значительного изменения кислотных и катионнообменных свойств органогенных горизонтов почв придорожных лесных и луговых сообществ, изменения характера естественных миграционных потоков элементов в системе «почва–растение» и их накопления.

Изучение ответной реакции деревьев и кустарников, произрастающих вдоль автотрассы М1/Е30 (Брест – Минск – граница Российской Федерации), на последствие применения противогололедных реагентов проводилось сотрудниками ЦБС НАН Беларуси в рамках задания ГПФИ «Ресурсы растительного и животного мира-35» в 2006–2010 гг.

Загрязнение растительности вблизи источников эмиссий происходит преимущественно аэральным путем. Кроны деревьев служат фильтром аэрозольных частиц. Часть отложений на их поверхности – необратимо абсорбированные загрязнители, которые вследствие малых размеров способны проникать внутрь тканей ассимиляционных органов. При выпадении осадков часть ранее отложившихся в кронах твердых частиц и соединений смывается.

При обследовании произрастающих вдоль автодорог древостоев отмечено значительное повреждение хвои и побегов в нижних частях крон, произрастающих на опушках. Сравнение результатов анализов смывов хвои с деревьев с контрольными показало, что на поверхности поврежденных деревьев содержание практически всех анализируемых элементов и соединений превышает контрольные значения в два раза и более. Внедрение поваренной соли в биоцикл придорожных насаждений происходит из противогололедного материала (ПГМ). Поврежденная хвоя содержит на поверхности превышающее контрольные значения количество ионов натрия и хлора в десятки раз. При этом степень загрязнения фитотоксикантами зависит от положения дороги относительно прилегающих насаждений: наибольшее, когда дорога в насыпи, наименьшее – в выемке. На поверхность низко растущих ветвей деревьев соль попадает в результате разбрызгивания автомобилями талых вод и мокрого снега, насыщенных растворами и кристаллами солей. Турбулентные потоки воздуха, создаваемые движущимся транспортом, способствуют распространению водно-солевых взвесей и «соленого тумана» вверх и их оседанию на хвое, листьях (при их наличии) и побегах деревьев. Хлориды в больших концентрациях токсичны для деревьев и кустарников. Под их влиянием уменьшается количество хлорофилла и появляется некроз тканей. Осевшая на хвое и побегах соль вызывает их обезвоживание, а при проникновении в ткани – повреждение.

На основании изучения морфологических и физиолого-биохимических показателей ассимилирующих органов исследуемых растений, произрастающих в зонах с различной степенью техногенной нагрузки, установлены компенсаторные реакции, связанные с увеличением содержания хлорофилла и повышением плотности охвоения побегов.

Установлены особенности сезонной динамики накопления остаточных количеств ПГМ в хвое и листьях древесно-кустарниковой растительности придорожных насаждений. Показано, что повышение концентрации хлорид-ионов в ассимилирующих органах исследуемых растений происходит дважды за сезон (в апреле и июле). Выявлены три группы хвойных растений, отличающихся уровнем поглотительной способности хлорид-иона.

Показано принципиальное отличие отрицательного воздействия ПГМ на состояние лиственных деревьев и кустарников, произрастающих вдоль автомагистралей, заключающееся в повреждении вегетативных почек, а не листьев. Это приводит к образованию «розеточности» вегетативных побегов деревьев и кустарников. Токсичные ионы хлора вызывают гибель почек, которые в наименьшей степени защищены от последствий применения ПГМ. В отличие от хвойных растений у лиственных закладывается не одна, а несколько почек. В случае гибели ее начинает отрастать новая, в случае гибели этой в рост пускается другая и т. д. В результате мы наблюдаем появление «пышных розеток», образующихся из спящих почек.

Таким образом, применение песчано-соляных смесей в качестве основного средства для борьбы с наледями на дорогах нашей страны существенно усугубляет экологическую ситуацию и ухудшает состояние защитных дорожных зеленых насаждений. В связи с этим стоит задача разработки комплекса мероприятий по снижению негативной нагрузки. На наш взгляд, один из рациональных путей решения данной проблемы – подбор ассортимента представителей местной и мировой дендрофлоры, способных выдерживать усиливающуюся негативную антропогенную нагрузку.

С целью ограничения негативного влияния остаточных количеств ПГМ, выхлопных газов и пыли на состояние снегозащитных насаждений их следует защитить посадками растений-фильтров. В первом ряду от проезжей части следует сажать низкорослые солевыносливые кустарники (шиповник, свидина белая, боярышник кроваво-красный, мягковатый, лох серебристый, арония черноплодная, кизильник блестящий, пузыреплодник калинолистный). Во втором ряду следует высаживать солевыносливые и газоустойчивые крупномерные кустарники (акация белая и желтая, облепиха обыкновенная, черемуха Маака). Третий и последующие ряды могут быть представлены любыми лиственными и хвойными деревьями.

Полученные результаты исследований имеют выраженную практическую направленность, так как совместно с БелДорНИИ Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь разработан дорожный методический документ ДМД 02191.3.019-2009 «Устройство и содержание техногенно устойчивых снегозадерживающих древесно-кустарниковых насаждений вдоль автомобильных дорог общего пользования», практическая значимость которого заключается в разработке научных основ для создания вдоль основных транспортных магистралей Беларуси новых древостоев, способных выдерживать усиливающийся антропогенный пресс и снижать вредное воздействие транспорта на окружающую среду [11]. Документ введен в действие с 1 марта 2009 г. приказом директора департамента «Белавтодор» № 04 от 12.01.2009 г.

Установлено, что оценка антропогенной нарушенности природных экосистем базируется на комплексном использовании ботанических, физиолого-биохимических и почвенных критериев, при этом прямое воздействие токсиантов на хвою и листья, ветви и ствол дерева менее опасно для древостоя

(при определенных условиях они способны к самоочищению) по сравнению с прямым действием – через почву, что ведет к физиологическим нарушениям и, в конечном счете, к ослаблению и гибели деревьев. Использование фитоиндикационных методов значительно снижает себестоимость выполняемых работ и по качеству получения информации несколько не уступает традиционным физико-химическим методам.

Разработана система критериев оценки состояния устойчивости растений в условиях техногенеза. Установлено, что такие показатели физиологического состояния растений, как содержание и соотношение пулов фотосинтетических пигментов, прочность связи хлорофилла с белок-липидным комплексом, содержание свободных аминокислот, показатели рН,  $rH_2$ , ЕН водных гомогенатов листьев древесных растений, целесообразно использовать для оценки общего состояния устойчивости растений в экстремальных условиях произрастания.

Разработанную методику по фитоиндикации загрязнения среды и состояния растительных комплексов Республики Беларусь можно рассматривать как внедрение в экологические исследования более чувствительных и надежных методов классических наук, позволяющих определять уровни загрязнения воздуха на обширных территориях; выполнять экологическое зонирование территорий по уровням загрязнения воздуха; определять степень влияния поллютантов на наземные экосистемы и снижения продуктивности насаждений.

Использование перечисленных выше методов позволяет осуществить инвентаризацию загрязнения среды и состояния зеленых насаждений, упростить структуру биогеоценотических исследований, разработать экологические нормативы антропогенных нагрузок на наземные экосистемы, а также стать основой для исследований по мониторингу состояния растительных комплексов нашей страны.