

## Газоустойчивость древесных растений Западной Сибири

В. Г. ЕРЕМЕЕВА, Е. С. ДЕНИСОВА\*

*Сибирская автомобильно-дорожная академия  
644050, Омск, просп. Мира, 5  
E-mail: valentynaeremeeva@rambler.ru*

*\*Омский государственный технический университет  
644050, Омск, просп. Мира, 11  
E-mail: malachova\_@rambler.ru*

### АННОТАЦИЯ

По реакции пигментного комплекса, изменению кислотности листовой пластинки, активности окислительных ферментов, водного режима и степени повреждения листовой пластинки изучена устойчивость ряда древесных растений Западной Сибири к токсическим веществам – сернистому газу, углеводородам и саже. Данные исследований могут применяться при озеленении санитарно-защитных зон предприятий.

**Ключевые слова:** газоустойчивость растений, фитотоксичность, озеленение, пигментный комплекс, биомониторинг.

Проблема устойчивости растений к атмосферным загрязнителям в последнее время приобретает особую актуальность и практическую направленность. В условиях загрязненной атмосферы зеленые насаждения должны быть высокоустойчивыми и производительными [1–4]. В то же время в различных почвенно-климатических условиях растения, несмотря на идентичность состава и концентрации токсикантов в окружающей среде, обладают различной газоустойчивостью [1, 2, 5].

Специфическими загрязнителями, имеющими максимальные выбросы в г. Омске, являются сажа и ароматические углеводороды (бензол, толуол, ксилол и др.) [6].

Наряду с обширным отечественным и зарубежным материалом о воздействии различных загрязнителей на растения, вопрос о фитотоксичности ароматических углеводоро-

дов (фенолов, бензолов и толуолов) освещен крайне слабо, отсутствуют также сведения о характере влияния сажи на дендрофлору, хотя эти частицы субмикронного диапазона являются важной составной частью и эмиссии промышленных источников, и выхлопных газов автотранспорта.

Все это определило основную цель исследования: изучить устойчивость растений к токсическим веществам (сернистому газу, углеводородам, техуглероду) по реакции их пигментного комплекса, рН клеточного сока, активности окислительных ферментов, водного режима.

Впервые в условиях Западной Сибири проведена комплексная оценка газоустойчивости растений в техногенной среде сажевых заводов и с применением натуральных и экспериментальных исследований дана сравнительная характеристика фитотоксичности углеводородов: метана, бензола, толуола и фенола, а также исследована фитотоксичность сажи.

Еремеева Валентина Георгиевна  
Денисова Елена Сергеевна

Полученные результаты могут быть использованы при создании насаждений в районах Западной Сибири с высокой загазованностью и запыленностью атмосферного воздуха. С этой целью данные исследований использованы ЗАО “Декоративные культуры” г. Омска, ООО “Техуглерод” и научно-исследовательским институтом проблем переработки углеводов (ИППУ) г. Омска. Оценка растений по физиолого-биохимическим показателям может быть использована для определения уровня загрязнения атмосферного воздуха.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовали древесные растения, широко используемые для озеленения городов и промышленных районов Омской области: березу повислую *Betula pendula* Roth., иву белую *Salix alba* L., клен ясенелистный *Acer negundo* L., сосну обыкновенную *Pinus sylvestris* L., тополь черный *Populus nigra* L., яблоню ягодную *Malus baccata* (L.) Borkh. Возраст изучаемых растений 15–20 лет.

Полевые исследования проводились в течение вегетационного периода 2000–2007 гг. в посадках растений, расположенных на различном удалении от предприятия технического углерода Омска. Зоны сильной загазованности: № 1 – находится на территории источника загрязнения; № 2 – отстоит от источника на 0,5 км (санитарно-защитная зона ООО “Техуглерод”); зона № 3 – средней загазованности, расположена соответственно на расстоянии 2 км от источника эмиссии. Все зоны размещены по вектору господствующих ветров. Для контроля взяты растения, находящиеся вне зоны действия промышленных предприятий – в 24 км от черты города. Для исследований во всех зонах выбирали по 10 модельных деревьев каждого вида. Листья отбирали в одном ярусе кроны, обращенной к источнику загрязнения.

При опрыскивании листьев растений использовали слабые растворы серной кислоты в концентрации 0,25, 0,5 и 1,0 %. Контрольную ветвь опрыскивали дистиллированной водой.

Для экспозиции растений парами углеводов использовали герметичные полиэти-

леновые камеры объемом 10 л. В камеры внесли навески бензола, толуола, фенола в концентрациях 30, 60 и 120 мг/м<sup>3</sup>, а также по 5, 10 и 30 мг/м<sup>3</sup> всех этих токсикантов суммарно. При фумигации растений предельными углеводородами использовали поверочные газовые смеси с аттестованным содержанием метана 30, 60 и 120 мг/м<sup>3</sup>. Для эксперимента на дереве выбирали ветви с равным количеством листьев и в одинаковых условиях освещенности. Результаты сравнивали с контрольной ветвью, находящейся в камере без токсикантов.

В экспериментах с искусственным опудриванием листьев применялась сажа, выпускаемая ООО “Техуглерод”, которая наносилась по 20, 40 и 60 мг/м<sup>3</sup> листа.

Газоустойчивость растений определяли через 24 и 72 ч после воздействия токсикантов.

В полевых экспериментах, а также после обработки листьев определяли: степень повреждения листовой пластинки, рН гомогената, активность ферментов каталазы, полифенол- и пероксидазы, содержание пигментов в листьях.

Повреждаемость листьев определяли по пятибалльной системе Н. П. Красинского. рН гомогената листьев снимали на иономере универсальном ЭВ-74. Активность фермента каталазы определяли титрованием неразложившейся перекиси водорода перманганатом калия; активность ферментов полифенол- и пероксидазы – йодометрическим методом [7]. Количественный анализ фотосинтетических пигментов проводили в ацетоновой вытяжке на спектрофотометре “Спекол” [7]. Водный режим растений определяли по общему содержанию воды в листьях – высушиванием при 105 °С и по водному дефициту – взвешиванием после насыщения листьев водой [7].

Все измерения проводили в трехкратной повторности у каждого модельного растения. Для проверки достоверности различий между двумя выборками использовался критерий Стьюдента. Данные обрабатывались также методом однофакторного дисперсионного анализа.

Во всех газодинамических зонах проведены анализы почв и атмосферного воздуха.

В почвах определяли: механический состав – экспресс-методами “шнура” и “втира-

ния в ладонь”; величину рН – потенциометрическим методом, гумус – методом И. В. Тюрина, нитратный азот – дисульфифеноловым, а щелочность, кальций – комплексометрическим методом [8]. Также проводился качественный анализ почв на содержание сульфатов и хлоридов.

Все используемые методы анализа воздушной среды в газодинамических зонах внесены в государственные перечни методик, допущенных к применению. В атмосферном воздухе газодинамических зон определяли диоксид азота, сероводород, сернистый газ, фенолы фотоколориметрическим методом, оксид углерода – электрохимическим методом по РД 52.04.186-89, углеводороды – хроматографическим методом по ПНД Ф 13.1:2:3.25-99.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Атмосферный воздух наиболее загрязнен в г. Омске в районе ООО “Техуглерод” [5, 6], занимающегося выпуском технического углерода (сажи) для шинной промышленности и в настоящее время являющегося одним из крупнейших предприятий отрасли в России. Результаты анализа состава промышленных выбросов ООО “Техуглерод” показали преимущественное содержание в них предельных и ароматических углеводородов и сажи, в связи с чем наблюдается повышенное содержание этих токсикантов в атмосферном воздухе газодинамических зон. Зоны сильной загазованности (территория и санитарно-защитная зона предприятия) характеризуются примерно одинаковым уровнем загрязнения, а в зоне, расположенной на расстоянии 2 км, уровень загрязнения в 1,5–4 раза ниже. Средние концентрации фенола в первых двух зонах за 2003–2008 гг. составляли в среднем 1,6 ПДК, бензола – 1,8, толуола – 1,2, нафталина – 1,2 ПДК; по NO<sub>2</sub>, СО, Н<sub>2</sub>S, саже и предельным углеводородам превышения ПДК носили разовый характер и средние концентрации за изучаемый период наблюдались примерно в пределах ПДК, по остальным ингредиентам – SO<sub>2</sub>, этилбензолу, мета- и параксилолу – превышений ПДК не отмечено.

Участки исследования характеризуются сходным агрохимическим составом. Почвы

представлены черноземами, тяжелыми суглинками, относятся к среднегумусным. рН почв почти всех участков близка к нейтральной, но на территории завода и вблизи него обнаружили щелочную реакцию почв, что представляется закономерным, поскольку верхний слой почв этих зон сильно загрязнен техническим углеродом. Как показали результаты анализов, щелочность почв связана с содержанием в них гидрокарбонатионов, а нормальных карбонатов, характерных для содовых солонцов, обнаружено очень мало. Обеспеченность почв всех исследуемых участков нитратным азотом средняя. Количество обменного кальция высокое, а сульфатов – низкое (тысячные доли процента), обнаружены лишь следы хлоридов.

*Полевые исследования* растений различных газодинамических зон не выявили заметных повреждений листьев растений. Только у березы повислой в загрязненных зонах угнетающее действие воздушных загрязнителей отразилось на молодых, растущих листьях, которые были слегка деформированы и имели вид лодочки. Это происходило, видимо, от ожога краев молодых листочков, в результате чего задерживался рост краевой зоны при продолжении роста срединной части листовой пластинки. Листья других исследуемых растений имели более светлую окраску и были мельче фонных аналогов.

Дисперсионный анализ показал достоверное влияние промышленных выбросов на растения, сила влияния составляет 0,30–0,95, достоверность – 95–99,9 %. Разница между физиолого-биохимическими показателями фонных растений и произрастающих в загрязненных зонах во всех случаях достоверна с 0,5–1 % уровнем значимости.

Водный режим исследуемых растений загрязненных зон не имеет значительных отклонений от контрольных аналогов. Сравнительный анализ видов показывает более существенные изменения у березы повислой. Водный дефицит исследуемых растений в среднем не превышает 10 %, т. е. представляет собой обычное явление, не причиняющее растению вреда. Следовательно, несмотря на то, что листья растений в зонах сильного загрязнения густо покрыты сажей, уве-

личивающей скорость транспирации, все исследуемые виды деревьев сохраняют нормальный водообмен.

Снижение рН в загрязненных зонах отмечено у березы (до 20 % от контроля). У остальных видов смещения рН были незначительны, в некоторых случаях обнаруживается увеличение этого показателя по сравнению с фоном.

При изучении пигментного комплекса установлено, что аэротехногенное загрязнение вызывает значительное снижение хлорофиллов и каротиноидов у березы повислой, с нарастанием нарушений в течение вегетационного периода. Наименее чувствителен пигментный комплекс у тополя черного и яблони ягодной. Небольшое снижение хлорофиллов и каротиноидов в июне – на 12–39 % – сменяется у этих видов некоторым повышением их в июле и августе. Содержание в воздухе газов стимулирует фотосинтез и увеличивает число пигментов у устойчивых видов растений. Изменения в пигментном комплексе происходят главным образом за счет изменения содержания хлорофилла в, свободная форма которого менее стойка к воздействию различных агентов, чем связанная с белком.

Активность ферментов подвержена наиболее сильным изменениям у березы повислой и клена ясенелистного, наименьшим – у тополя черного и яблони ягодной. У березы повислой значительное повышение активности полифенолоксидазы в загрязненных зонах в июне и в июле сменяется ингибированием в августе, что также свидетельствует о высокой чувствительности березы к загрязнению.

*Экспериментальные исследования.* Выявлено достоверное влияние обработки серной кислотой на все показатели растений ( $\eta = 0,83 - 0,99$ ;  $p < 0,001$ ). Опрыскивание листьев исследуемых видов даже 0,25 % раствором серной кислоты привело к их значительному поражению, что особенно заметно у березы бородавчатой и сосны обыкновенной. У всех исследуемых видов молодые листья повреждались в 2–3 раза больше, чем зрелые, что является отражением отличий в скорости и объеме накопления в них токсических веществ. В последующем для ана-

лиза биохимических показателей использовались зрелые листья растений.

Видимое повреждение листьев соответствует изменению активности каталазы. В наибольшей степени активность этого фермента ингибируется у сосны, за ней следует береза, далее – тополь, яблоня и ива. У клена в норме значительно более низкая активность каталазы (1,5 единицы – мл 0,1 н  $H_2O_2$ ), чем у остальных видов (в среднем – 10 единиц). После опрыскивания кислотой в июле активность каталазы у него падает до нуля, в августе при обработке 0,25 % раствором активность фермента снижается до 11–14 % к контролю, в дальнейшем, с увеличением концентрации действующего токсиканта, снова опускается до нуля. У ивы нормальная активность каталазы высокая (37 единиц), поэтому после действия токсиканта снижение у нее наиболее незначительное по сравнению с другими видами (от 99 до 61 %), различия между контрольными и опытными листьями становятся достоверными только при концентрации действующего токсиканта 0,5 %. У всех видов растений отмечается большая степень нарушений в активности фермента через 24 ч после опрыскивания, через 72 ч активность каталазы частично возвращается к норме, в среднем на 10–50 %, особенно сильно это заметно у тополя. Видимо, газоустойчивость тополя связана с его способностью восстанавливать активность ферментов после повреждения.

Характер изменения активности полифенолоксидазы под действием серной кислоты выражен более рельефно, чем каталазы. У тополя и яблони опрыскивание вызвало незначительное снижение активности фермента, с последующим повышением уровня активности при увеличении концентрации. По-видимому, у этих видов с увеличением воздействия идет постепенное нарастание физиолого-биохимических нарушений, и рост активности оксидаз – защитная реакция на токсиканты, которая обеспечивает сопротивляемость организма и способствует обезвреживанию вредных соединений. У березы же и ивы сразу наблюдалось повышение активности полифенолоксидазы, которая падала при нанесении серной кислоты высокой концентрации. Это падение мы обосновываем необра-

тимостью нарушений, ведущих к гибели листьев, нарушений, с которыми полифенолоксидаза не в состоянии справиться. Вновь наиболее устойчивыми оказались ива белая и тополь черный. У ивы различия между опытными и контрольными листьями становятся достоверными только при максимальной концентрации. У тополя смещение активности полифенолоксидазы в первом варианте (0,25 % раствор) достоверно при  $p < 0,05$ , в последующих – при  $p < 0,01$ , тогда как у других растений различия достоверны при  $p < 0,001$ . Наиболее чувствительна к действию кислоты полифенолоксидаза у сосны и клена: активность полифенолоксидазы у сосны после обработки составляет 50–0 % к контролю, у клена – 84–16 %. В случае с полифенолоксидазой частичное восстановление нарушений через 72 ч, как это было с каталазой, не отмечено. Наоборот, смещения в активности этого фермента продолжали усугубляться. Отсюда можно сделать вывод, что каталаза более чувствительна к действию вредных соединений и реагирует на них сразу. А нарушения в активности полифенолоксидазы проявляются медленнее и остаются на более долгий срок.

Показатель рН под действием кислоты, как и следовало ожидать, значительно понижается. Результаты видовой устойчивости здесь полностью совпадают с результатами данных по изменению активности ферментов.

Ответная реакция пигментного комплекса растений на действие серной кислоты заключена в достоверном ( $p < 0,05–0,001$ ) снижении количества хлорофиллов и каротиноидов прямо пропорционально наносимой концентрации (рис. 1). В наибольшей степени уменьшается количество пигментов у сосны

обыкновенной: хлорофиллов – до 80–56 % к контрольным листьям, каротиноидов – до 90–50 %. У всех остальных видов снижение примерно одинаковое – до 92–70 %. Соотношение пигментов  $a/v$  повышается у растений до 110–140 % к контролю и с увеличением концентрации кислоты увеличивается, причем у сосны, самого неустойчивого вида, оно выше, чем у других растений. Восстановления пигментного комплекса через 72 ч после опрыскивания не наблюдалось.

Нами проведены предварительные эксперименты с различными концентрациями углеводов при искусственной фумигации растений. При экспозиции концентрациями ниже  $30 \text{ мг/м}^3$  существенных изменений в физиологии растений не отмечено, вследствие чего они в работе не обсуждаются. Концентрация газа, приводящая к появлению видимых повреждений листьев растений, взята нами за конечную. Поскольку известно, что суммарный эффект нескольких токсикантов превышает аддитивный, при одновременной фумигации бензолом, толуолом и фенолом взяты несколько более низкие концентрации.

Среди всех изученных углеводов только фенол в максимальной концентрации привел к визуальным повреждениям листьев. Наиболее сильно ожоги проявились у ивы, клена и сосны. Листья ивы приобрели темно-серую маслянистую окраску, у клена произошло обесцвечивание и скручивание листовой пластинки. У березы и тополя повреждения не замечены, краевые зоны листа лишь слегка потемнели.

Дисперсионный анализ выявил весьма сильное влияние углеводов на активность

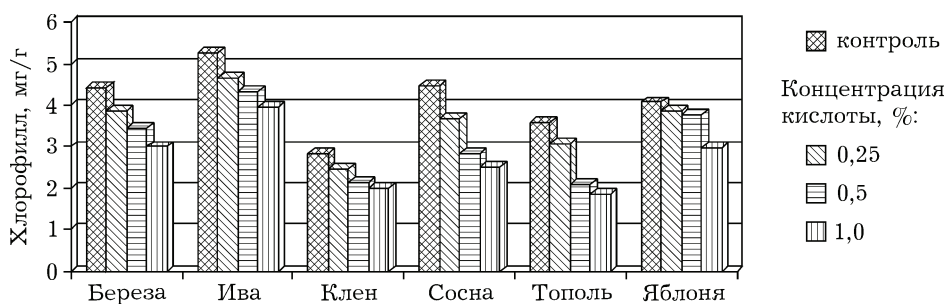


Рис. 1. Содержание хлорофиллов (мг/г воздушно-сухой массы) через 24 ч после обработки серной кислотой (июль)



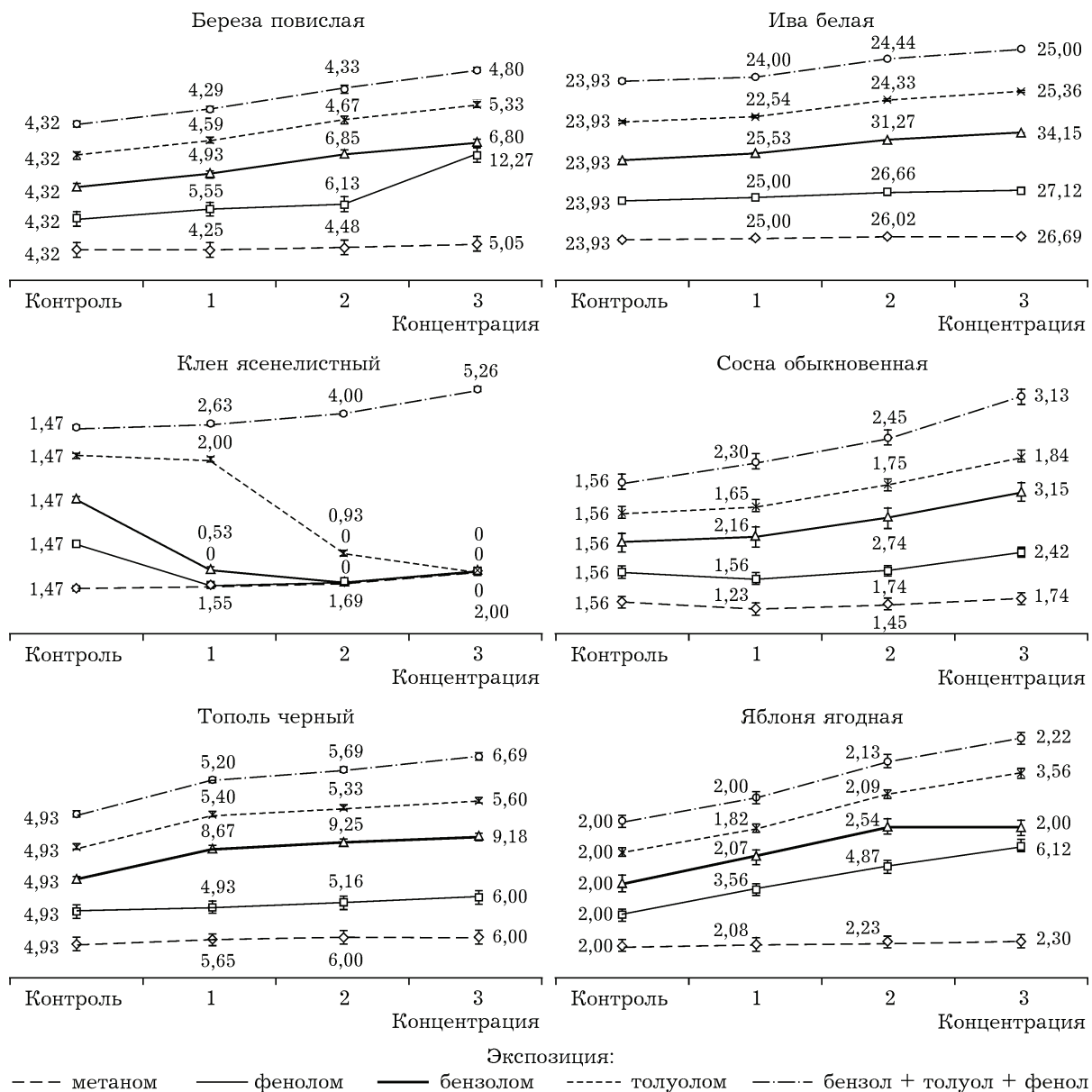


Рис. 2. Активность фермента полифенолоксидазы (мл 0,01 н J) растений после экспозиции углеводородами (июль).

Концентрация 1, 2, 3: 30, 60, и 120 мг/м<sup>3</sup> соответственно, для бензола + толуола + фенола – 5 × 5 × 5, 10 × 10 × 10 и 20 × 20 × 20 мг/м<sup>3</sup>

ферментов ( $\eta = 0,89-0,99$ ;  $p < 0,001$ ). Экспозиция оказывает стимулирующее влияние на активность полифенолоксидазы всех изученных растений. Только в листьях клена ясенелистного активирование полифенолоксидазы сменяется ее ингибированием с повышением концентрации (рис. 2). Повышение активности полифенолоксидазы у него (105–136 % к контролю) наблюдали в отношении менее токсичного метана и при низких кон-

центрациях толуола. Сильным изменениям подвержена полифенолоксидаза у сосны (в среднем 170 % по отношению к контролю) и яблони – (в среднем 139 %).

Повышение активности пероксидазы растений после фумигации намного значительнее, чем полифенолоксидазы (рис. 3). Полученные данные свидетельствуют, что наиболее токсичными для растений являются фенол и смесь паров ароматических углево-

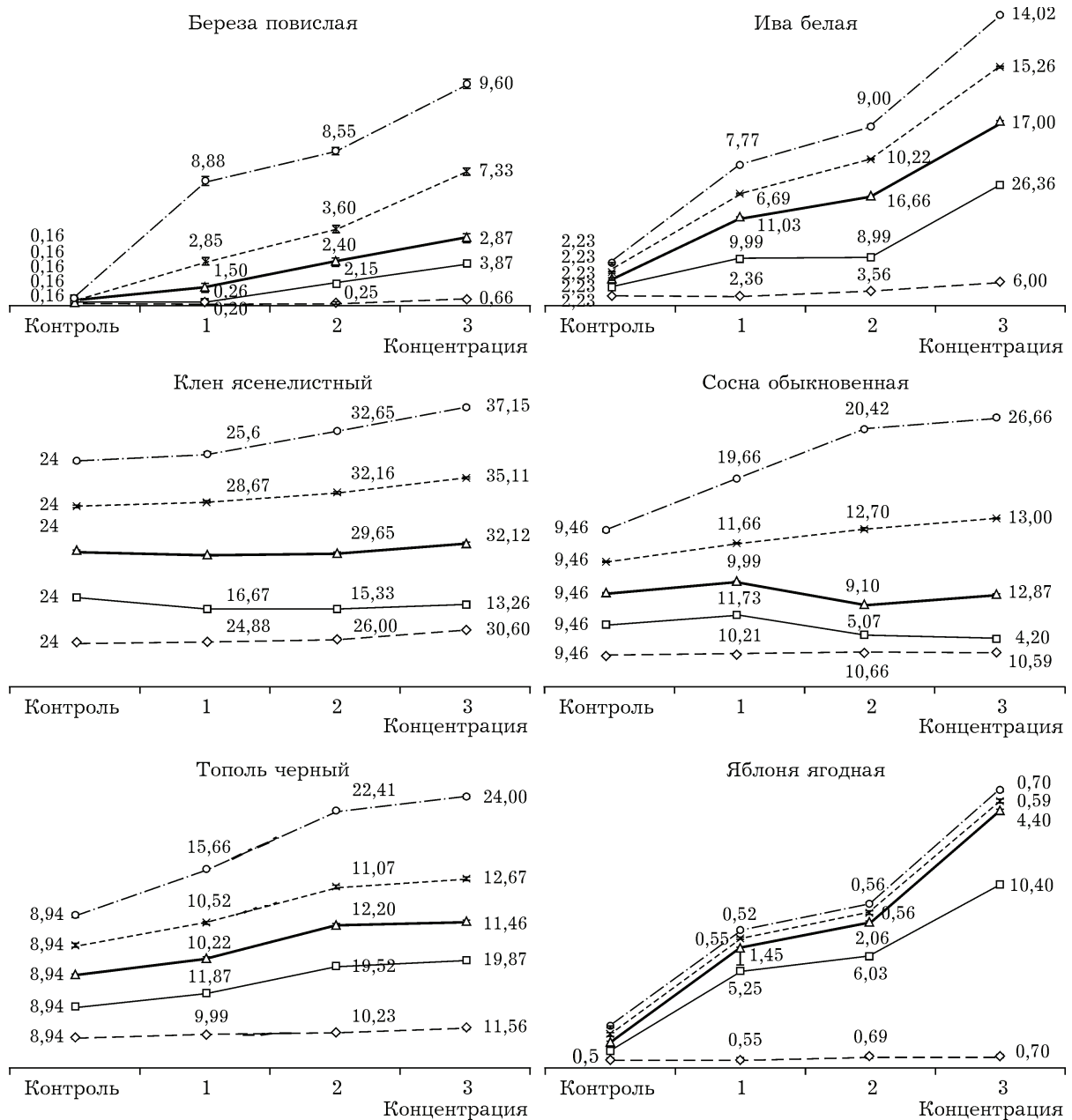


Рис. 3. Активность фермента пероксидазы (мл 0,01 N) растений после экспозиции углеводородами (июль).

Обозначения см. рис. 2

дородов, наименее – предельные углеводороды.

Анализ данных об активности каталазы после опудривания технической сажой показал ее достоверное снижение у всех исследуемых растений. В большей степени каталаза уменьшалась у клена и сосны – видов с наименьшей выраженностью этого фер-

мента. В июне при максимальной концентрации опудривания активность каталазы у них падает до нуля ( $\eta = 0,96 - 0,99$ ;  $p < 0,001$ ). У остальных видов через 24 ч снижение составляет 98–63 % к контролю, через 72 ч – 96–68 % ( $\eta = 0,89-0,98$ ;  $p < 0,001$ ). По степени устойчивости каталазы изученные виды располагаются следующим образом: яблоня

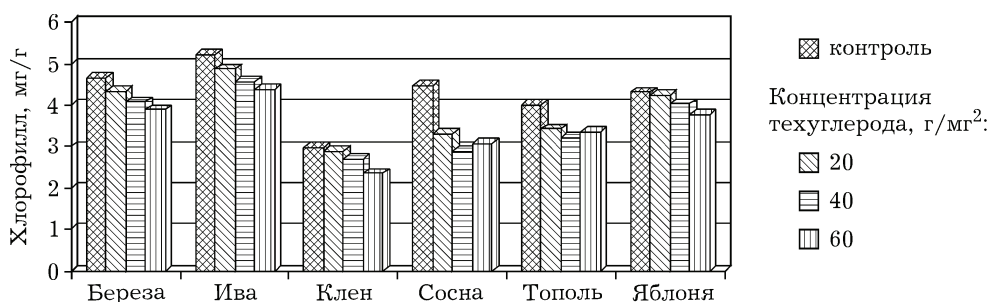


Рис. 4. Содержание хлорофиллов (мг/г воздушно-сухой массы) через 24 ч после нанесения технического углерода (июнь)

ягодная > тополь черный > ива белая > береза бородавчатая > клен ясенелистный > сосна обыкновенная.

Ответная реакция на действие техуглерода полифенолоксидазы менее существенна, чем каталазы ( $\eta = 0,93-0,99$ ;  $p < 0,001$ ). Смещения в активности этого фермента у ивы и яблони едва заметны и статистически не достоверны. В то же время у сосны, клена и березы отмечено ингибирование полифенолоксидазы, в некоторых случаях до нуля. У тополя активность фермента повысилась в 2 раза. Порядок расположения изученных видов в ряду устойчивости полифенолоксидазы такой же, как и в случае с каталазой. Через 72 ч после нанесения сажи активность каталазы и полифенолоксидазы растений частично возвращается к норме. Что касается помесечной динамики, то в июле растения более устойчивы к действию токсиканта, чем в июне. Особенно сильно возрастает устойчивость каталазы у тополя и яблони, снижение ее активности у этих видов в июле перестает быть достоверным.

При изучении пигментного комплекса отмечено небольшое понижение хлорофиллов и каротиноидов у всех растений примерно на одну величину – 10–20 % (рис. 4). Различия между опытными и контрольными листьями в ряде случаев не достоверны или достоверны при 5 и 1 % уровне значимости. Можно отметить только несколько большую чувствительность пигментного комплекса сосны обыкновенной по сравнению с другими изученными видами. Не отмечено четкой зависимости между дозой и эффектом. Видимо, небольшой срок нахождения слоя сажи на листьях при эксперименте недостаточен для глубокого снижения пигментов из-за ее относительно низ-

кой токсичности для растений. Не замечено существенных отличий и при сравнении пигментного комплекса растений, обработанных в июне и июле.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ полученных данных подтверждает видовые отличия растений по газоустойчивости. Полевые исследования показали высокую газоустойчивость тополя черного и яблони ягодной, береза повислая оказалась наиболее чувствительной. Наиболее резистентными к действию серной кислоты оказались тополь и ива белая, а чувствительными – сосна и береза. В отношении предельных и ароматических углеводов газоустойчивость проявил тополь, наиболее сильно повреждались клен и сосна. Низкая степень повреждения листьев техническим углеродом отмечается у тополя и яблони, высокая – у клена и сосны.

Обобщая полевые и экспериментальные исследования, можно прийти к выводу, что газоустойчивостью к выбросам нефтехимических предприятий Западной Сибири, сходных по спектру загрязняющих веществ с “Техуглеродом”, обладают тополь черный и яблоня ягодная, которые способны поддерживать нормальную жизнедеятельность как при хроническом действии токсикантов, так и при их кратковременном воздействии в высоких концентрациях, неустойчивы – сосна обыкновенная, береза повислая и клен ясенелистный.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов А. К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем. СПб.: Наука. Ленингр. отделение, 1998. 328 с.



2. Сергейчик С. А. Растения и экология. Минск: Ураджай, 1997. 224 с.
3. Air pollution and plant life / ed. J. N. Bell, M. Treshow. N.Y.: Wiley, 2002. 465 p.
4. Environmental pollution and plant response / ed. S. B. Agrawal. Boca Raton: Lewis Publishers, 2000. 393 p.
5. Григорьев А. И. Индикация состояния окружающей среды. Омск: ОМИПП, 2003. 128 с.
6. О состоянии и об охране окружающей среды Омской области в 2008 г. / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Омской области. Омск: ООО "АРТЛИК", 2009. 200 с.
7. Федорова А. И., Никольская А. Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды. М.: ВЛАДОС, 2003. 286 с.
8. Пирогова Т. И. Лабораторный практикум по экологии. Омск: ОмГПУ, 1999. С. 15–59.

## Gas Stability of Woody Plants of West Siberia

V. G. EREMEEVA, E. S. DENISOVA\*

*Siberian Automobile Road Academy  
644050, Omsk, Mir ave., 5  
E-mail: valentynaeremeeva@rambler.ru*

*\*Omsk State Technological University  
644050, Omsk, Mir ave., 11  
E-mail: malachova\_@rambler.ru*

Stability of a number of woody plants of West Siberia against toxic compounds – sulphur dioxide, hydrocarbons and carbon black – was studied on the basis of the reaction of pigment complex, changes of the acidity of leaves, activity of oxidative enzymes, water schedule and degree of leaf damage. These studied may be applied in planting green areas in sanitary-buffer areas of enterprises.

**Key words:** gas stability of plants, phytotoxicity, planting, pigment complex, biomonitoring.