

УДК 630
ББК 43.4
К90

Ответственный редактор
член-корреспондент РАН *Г.С. Розенберг*

Рецензенты:

доктор биологических наук *И.М. Габбасова*,
доктор биологических наук *И.Ю. Усманов*,
доктор биологических наук *Ю.А. Янбаев*

Кулагин А.А.

Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей / А.А. Кулагин, Ю.А. Шагиева; [отв. Г.С. Розенберг].

- М.: Наука, 2005. – 190 с.: ил.

ISBN 5-02-033450-2 (в пер.)

В монографии обобщены данные о накоплении и морфофизиологических особенностях древесных растений в условиях загрязнения окружающей среды металлами. Показана роль древесных растений в биоконсервации и ограничении распространения элементов при разработке месторождений полезных ископаемых, их переработке и складировании отходов горнодобывающей промышленности. Дана характеристика устойчивости и адаптационного потенциала основных древесных растений – лесообразователей Южного Урала и сопредельных территорий.

ТП 2005-I-184

ISBN 5-02-033450-2 (в пер.) © Российская академия наук, 2005
© Редакционно-издательское
оформление.
Издательство “Наука”, 2005

ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы, вызванные хозяйственной деятельностью человека, имеют комплексный характер. В значительной степени они обусловлены включением в миграционные потоки всех основных цепей техногенных токсикантов, в том числе и тяжелых металлов. Доля металлов в выбросах промышленных предприятий достигает 80–90% от общей массы. Среди множества видов деятельности добыча, переработка и утилизация полезных ископаемых при существующих технологиях наносят наибольший вред естественным местообитаниям животных и растительных организмов, изменяют природные ландшафты, вызывают деградацию существующих биогеоценозов, нарушение связей в биоте, осложнение экологической и санитарной обстановки в населенных пунктах и т.д. [Красинский, 1950; Рябинин, 1962; Тарабрин и др., 1971; Антипов, 1979; Гудериан, 1979; Махнев, Мамаев, 1979; Шилова и др., 1979; Шварц, 1980; Кулагин, 1985; Тарабрин и др., 1986; Воронин, 1989; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Бабушкина, Луганский, 1990; Лесные..., 1990; Пигулевская, 1990; Ягодин, 1990; Коршиков, 1994; Сергейчик, 1984, 1994; Биоиндикация..., 1994; Коршиков, 1996; Розенберг и др., 1998; Головкин, 1999; Sillen, Martell, 1964; Wood, 1974; Dassler, 1981; Smith, 1981; Metal..., 1988; Sheiber, 1990). Загрязнение окружающей среды происходит за счет развеивания и размывания хвостохранилищ обогатительных фабрик, отвалов руды и рудовмещающих пород, образующих интенсивные потоки рассеяния в водные системы и локальные ареалы рассеяния в почву. Значительную долю в потоке поллютантов составляют пылегазовые выбросы в атмосферу в процессе обогащения руды и пылевые выбросы при открытых горных разработках, загрязняющие атмосферу и приводящие к техногенным аномалиям почв. Избыточное количество отходов, поступающих в процессе функционирования горнодобывающих предприятий, приводит к нарушению устойчивого равновесия в природных экосистемах [Глазовская, 1968, 1972, 1992; Петрунина, 1974; Гетко, 1975, 1989; Ковда и др., 1979; Лукашев, Симуткина, 1984; Шилова и др., 1984; Черных, 1991; Гуральчук, 1994; Пасынкова, 2001; Peterson, 1975; Ernst, 1976; Gough et al., 1979].

Исследования особенностей аккумуляции тяжелых металлов древесными растениями связаны с необходимостью оценки биосферных и средостабилизирующих функций древесных, выполняющих роль фитофилтра на пути распространения поллютантов в окружающей среде [Ратнер, 1950; Сабинин, 1965; Яговой и др., 1966; Кулагин, 1974; Тарабрин и др., 1971; Берзиня, 1980; Добровольский, 1980; Ильин, Степанова, 1982; Жизнь растений, 1982; Реймерс, Яблоков, 1982; Зырин, Обухов, 1983; Косицин, Алексеева-Попова, 1983; Касимов, 1985; Ягодин и др., 1988; Кузьменко, Сивак, 1990; Кулагин и др., 2000; Усманов и др., 2001; Turner, 1969; Antonovics et. al., 1971]. Древесные растения поглощают и нейтрализуют часть атмосферных поллютантов, задерживают пылевые частицы, сохраняя прилегающие территории от пагубного воздействия экотоксикантов [Красинский, 1950; Рябинин, 1962; Тарабрин и др., 1971; Гудериан, 1979; Махнев, Мамаев, 1979; Воронин, 1989; Коршиков, 1994; Сергейчик, 1984, 1994; Розенберг и др., 1994; Гиниятуллин и др., 1998; Николаевский, 1979, 1998; Кулагин и др., 1997, 2000; Оценка экологического..., 2001; Sheiber, 1990].

При выборе древесных пород для создания санитарно-защитных насаждений и рекультивации нарушенных земель предпочтение отдается в первую очередь тем породам, которые являются коренными обитателями мест предполагаемой высадки, отличаются малотребовательностью к условиям произрастания, высокой засухо- и морозоустойчивостью, характеризуются быстрым ростом, декоративностью, устойчивостью к промышленным загрязнителям и способностью их аккумулировать в наибольшей степени территорий [Красинский, Побединская, 1950; Фрейберг, 1969; Илькун, 1971; Чуваев и др., 1973; Антипов, 1979; Дашкевич, 1982; Белова и др., 1983; Борзенец, 1983; Бурцев, 1983; Баталов и др., 1991; Шугай, 1997; Чурагулова, 1998; Кулагин и др., 2000, Оценка экологического..., 2001; Epstein, 1972; Clark, 1983; Thomas, 1984].

Однако способность растений аккумулировать большое количество металлов не может выступать в качестве единственного критерия при составлении ассортимента пород для “зеленого строительства”. Взаимодействие “металл – растение” сложное и многогранное явление, при котором необходимо учитывать особенности попадания токсиканта в окружающую среду, фитотоксичность поллютантов, ответные реакции организма на попадание токсичных ингредиентов в окружающую среду и растение, а также множество других аспектов. Основной целью настоящей работы является исследование морфофизиологических изменений при биоаккумуляции металлов в древесных растениях, выявление особенностей адаптации и устойчивости древесных растений в условиях полиметаллического загрязнения окружающей среды.

В работе представлена краткая физико-географическая характеристика республики Башкортостан с описанием уникальности природно-климатических условий региона исследований; приводится методологическая часть, в которой отражены подходы к проведению исследовательских работ, а также дана краткая эколого-ботаническая характеристика исследуемых видов древесных растений с точки зрения их использования при создании санитарно-защитных насаждений. Фактический материал представлен в виде отдельной главы, где описана роль металлов в жизни растений, животных и человека. Затем последовательно характеризуются особенности развития растений в условиях загрязнения окружающей среды металлами, особенности биоаккумуляции и повреждений растений металлами; приведены характеристики анатомо-морфологических и физиологических изменений, которые происходят в растениях под действием металлов. В конце книги представлены материалы посвященные общей характеристике состояния лесных экосистем, биоаккумуляции металлов древесными растениями и оценке адаптивных изменений, происходящих в растениях при произрастании в условиях техногенеза.

Авторы выражают благодарность д.б.н., профессору И.Ю. Усманову, д.б.н., профессору Я.Т. Суюндукову, д.б.н., профессору Ю.А. Янбаеву, д.б.н. И.М. Габбасовой, д.б.н., профессору Ф.Х. Хазиеву, д.б.н., профессору А.Х. Мукатанову, к.б.н. Н.А. Мартыанову, к.б.н. Р.В. Уразгильдину, к.б.н. Г.А. Зайцеву, к.б.н. Р.Х. Гиниятуллину, Н.Г. Кужлевой, к.с.-х.н. Р.Р. Сулейманову, к.б.н. В.В. Федяеву, д.г.-м.н., профессору Д.Н. Салихову, д.б.н., профессору В.Т. Ярмишко, д.ф.-м.н., профессору А.Г. Боголюбову, д.б.н., профессору И.Ю. Никитину, а также коллегам из Института биологии УНЦ РАН и Башгосуниверситета за всестороннюю помощь при подготовке настоящей монографии.

Особую признательность авторы выражают ответственному редактору член-корреспонденту РАН, доктору биологических наук, профессору Г.С. Розенбергу благодарность за ценные советы и замечания.

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке и в рамках выполнения грантов РФФИ №№ 96-15-97070, 00-04-48688, 01-04-06382 МАС, 02-04-06399 МАС, 02-04-06400 МАС, 02-04-63125, 02-04-97909, № 02-03-97913, грант Комиссии РАН по работе с молодежью № 250 6-го конкурса-экспертизы 1999 г. научных проектов молодых ученых РАН и грантов Комиссии РАН по работе с молодежью “Поддержка деятельности базовых кафедр ведущих российских ВУЗов, созданных при Институтах РАН” в рамках ПЦР “Поддержка молодых ученых” (2003, 2004 гг.).

КРАТКАЯ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДУРАЛЬЯ, ЮЖНОГО УРАЛА И ЗАУРАЛЬЯ

Регион исследований расположен в пределах административных границ республики Башкортостан, на границе Европы и Азии, между $51^{\circ}31'$ и $56^{\circ}25'$ северной широты и $53^{\circ}10'$ и $60^{\circ}00'$ восточной долготы, занимая площадь $143,6 \text{ км}^2$ [Хисматов, 1987]. Протяженность с севера на юг составляет 550 км, с запада на восток – 450 км. Распределение населения (более 4 млн человек) по территории неравномерное: наибольшая плотность (свыше 25 чел/км^2) отмечена в западных, наименьшая (два чел/км²) – в горных районах республики.

Южные отроги Уральских гор занимают более 1/4 территории республики, около 2/3 приходится на Предуралье (юго-восточная окраина Восточно-Европейской равнины), и менее 1/10 – на Зауралье [Хисматов, 1979]. Перепад высот составляет от 58,7 м в устье р. Белой до 1640 м над уровнем моря – г.Ямантау. Высотная дифференциация такова: доля территории с абсолютными отметками до 500 м н.у.м. составляет 81,1; от 500 до 1000 м – 18,6; выше 1000 м – 0,3% от площади всей республики.

Климат Башкортостана умеренно-теплый, континентальный со значительными различиями между Предуральем, горным Уралом и Зауральем. Резко выделяются холодный и теплый периоды года; осень и весна относительно скоротечны. Ярким показателем континентальности служит средняя и абсолютная амплитуда температуры воздуха, которая на Южном Урале достигает $86\text{--}88^{\circ}$. По степени континентальности Башкортостан занимает одно из первых мест в Европейской части России. Воздушные массы Атлантики оказывают значительное влияние на климат республики, особенно в теплое время года; зимой возрастает значение азиатского антициклона. Суммарный объем осадков на территории Башкортостана составляет, в среднем, в год $90,5 \text{ км}^3$, причем 72% идет на испарение.

Продолжительность солнечного сияния довольно велика: в Уфе – 1941 час, в Стерлитамаке – 2023 часа за год (для сравнения: в Москве – 1560 часов, в Сочи – 2202 часа). Число пасмурных дней в году колеблется от 160 на западе до 110 на востоке.

Достаточно суровая и продолжительная зима приводит к глубокому промерзанию почвы, особенно интенсивному в Зауралье

(до 135 см), из-за низких температур воздуха и небольшой высоты снежного покрова. Средняя максимальная глубина промерзания почвы за зиму на Южном Урале составляет 50–95 см [Урал и Предуралье, 1968]. Установление устойчивого снежного покрова происходит в первой половине ноября. Оттаивание почвы до глубины 10 см в зависимости от характера весны и состава почвы происходит через 1–6 дней после схода устойчивого снежного покрова – для Предуралья – это конец апреля – середина мая; в Зауралье запаздывает оттаивание почвы на 4–5 дней, в горах – на 7–10 дней. Отметим неравномерность залегания снежного покрова в степных и лесостепных районах.

Горы Южного Урала – целая система меридиональных хребтов, разделенных широкими межгорными понижениями, шириной до 150 км. Водораздельным является хребет Уралтау [Балков, 1978]. Склоны хребтов ступенчатые, с каменными россыпями [Атлас БАССР, 1976]. Горный Южный Урал представляет собой сложно построенное герцинское сооружение, глубоко размытое в последующие этапы геологической истории и обновленное новейшими (неоген-четвертичными) движениями земной коры [Фаткуллин, 1994]. Хребты Южного Урала располагаются меридианально, параллельно друг другу, совпадая с простиранием структур складчатого фундамента. Исключением из общего правила являются хребты Уйташ, Каратау, которые протягиваются почти широтно. Практически все хребты Южного Урала расположены в пределах Башкирии, лишь небольшой “аппендикс” Челябинской области вклинивается в гористую часть.

Барьерный эффект гор [Максютов, 1974] оказывает влияние на формирование ландшафтов. Вблизи горных массивов наблюдается резкое смещение изотерм. Вытянутые с севера на юг хребты Урала создают значительное отличие климатических условий на западных и восточных склонах. В среднем, на каждые 100 м поднятия в горы температура понижается на 0,5 °С. Уменьшение показателя радиационного баланса в горах составляет, в среднем, около 1,5 ккал/см² в год на каждые 100 м высоты [Ефимова, Зубенок, 1966].

Наличие гор, на широтах 52–55° и долготах 56–59° привело к формированию горно-лесных, горно-лесостепных и горно-степных почв (доминируют подзолистые, серые лесные, грубоскелетные почвы). Почвенный покров республики очень разнообразен и включает более 60 наименований [Почвы Башкортостана, 1997]. Хорошо выражена и высотная дифференциация типов и подтипов почв. По возвышенностям и хребтам “северные” растительные группировки и свойственные им почвы проникают далеко на юг, где они мозаично сочетаются с более южными расти-

тельными группировками и почвенными образованиями. В западном (равнинном) Башкортостане представлены крупные почвенные группы: подзолистая, серая и черноземная. Для горной, горно-лесной зоны характерны скелетные, дерново-лесные и дерново-подзолистые почвы. На вершинах хребтов – горно-луговые, типичные и торфяные почвы. В Зауралье – маломощные обыкновенные и южные черноземы. По механическому составу (соотношении физической глины и физического песка) выделяют следующие основные разновидности почв: песчаная, супесчаная, суглинистая, глинистая, доля физической глины ($< 0,01$ мм) возрастает от 0 до 85%, а доля физического песка ($> 0,01$ мм) соответственно падает [Почвоведение, 1989]. Весной глинистые почвы холоднее песчаных, а осенью – наоборот [Шульгин, 1967].

Коэффициент лесистости в горной части равен 0,85–0,95; в лесостепной части 0,10–0,35. На сегодняшний день площадь сельскохозяйственных земель составляет 7375,2 тыс. га, или 51,36% от площади всей республики (в том числе пашни – 4834,5 тыс. га, или 33,66%), тогда как площадь лесного фонда – 6311,4 тыс. га, или 43,92% [Габитов, 1996; Бахтизин, 1996].

Для развития растений большую роль играют температура и влажность поверхности почвы и приземных слоев воздуха, которые в значительной степени зависят от особенностей микрорельефа. Согласно правилу А.И. Войкова, дневное нагревание и ночное охлаждение оказываются наибольшими на вогнутых формах рельефа (долины) и наименьшими на выпуклых формах (возвышенности), что связано с различной интенсивностью перемешивания воздуха [Булатова, Перетягина, 1975]. На температуру приземного слоя воздуха значительно влияет также угол падения (наклона) склона и его экспозиция: с увеличением угла падения на южных и восточных склонах температура возрастает, а на северных и западных – понижается. Разность температур почвы южных и северных склонов значительно больше таковой восточных и западных и увеличивается с возрастанием угла падения. При этом западные склоны при небольшом угле падения (до 15°) обычно теплее восточных, при большем (около 30°) – наоборот [Булатова, Перетягина, 1975]. Различия в температуре зависят не только от количества солнечной радиации, но и от испарения, которое интенсивнее на влажной почве северного склона [Сапожникова, 1950]. В ясную жаркую погоду разность температур между склонами различной экспозиции больше, чем в пасмурную дождливую погоду. Наибольшие колебания температуры почвы отмечаются на южных склонах, но по мере перехода к северным они уменьшаются [Шульгин, 1967]. Западные и восточные склоны получают примерно одинаковое количество тепла, но первые

Таблица 1

**Основные физико-географические параметры
республики Башкортостан [по данным Максютова, 1974]**

Степень расчлененности рельефа, км/км ²	2 (0,5–3,5)
Сельскохозяйственная освоенность, %	47 (4–76)
Облесенность, %	38 (14–73)
Глубина местных базисов эрозии, м	100 – 250
Средняя температура июля	+18° – +20 °С
Средняя температура января	–16°–17 °С
Годовая амплитуда	34°–37 °С
Максимальная температура	+42 °С
Минимальная температура	–49 °С
Максимальная амплитуда	91 °С
Среднегодовая температура	+1,5°– +2,0 °С
Сумма активных температур	2000°
Среднегодовое кол-во осадков, мм	600
Количество осадков за теплый период, %	75
Количество осадков за теплый период, мм	~350
Влажность, %	60–80
ГТК [по Максютову, 1974]	0,8
Длительность безморозного периода, дней	100–110
Продолжительность периода со средней температурой более +10 °С, дней	110–130
Продолжительность залегания снежного покрова, дней	155–175
Мощность снегового покрова на 10 марта, см	45–65 (30–100)

обычно теплее, так как они освещены во вторую половину дня, когда большая часть тепла идет не на испарение, а на нагревание.

Таким образом, территория Башкирии отличается большой разнородностью геологического строения, климатических условий, характера распределения почв и растительного покрова (табл. 1).

ОБЪЕКТЫ МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В течение последних 30-ти лет сотрудники лаборатории лесоведения Института биологии УНЦ РАН ведут наблюдения за формированием и развитием лесных сообществ в техногенных и природных ландшафтах Предуралья, Южного Урала и Зауралья. За эти годы сложились определенные принципы и оригинальные подходы к оценке состояния древесно-кустарниковой растительности.

Настоящие исследования проводили в два этапа: 1) изучение насаждений древесных растений, произрастающих в техногенных условиях; 2) проведение вегетационных экспериментов по выявлению характера и степени влияния сублетальных концентраций ионов различных металлов на древесные растения (на примере тополя бальзамического).

На территории Южного Урала и в Башкирском Зауралье в зоне воздействия горнодобывающих предприятий, работающих на базе полиметаллических месторождений, были проведены комплексные работы по исследованию накопления и распределения ряда тяжелых металлов в почвах и растениях (рис. 1). Длительность работы горнообогатительных комбинатов составляет 50–70 лет. В их состав входят рудные карьеры, обогатительные фабрики, подземные рудники, хвостохранилища, автотранспортные предприятия, ремонтно-механические заводы, известняковые карьеры, различные цеха. Месторождения разрабатываются как открытым, так и шахтным способами.

Естественную растительность, образующуюся на промышленных отвалах и участках, которые подверглись лесной рекультивации оценивались с точки зрения формирования растительного покрова. Выбор участков, закладку и описание пробных площадей проводили с учетом известных и общепринятых методических подходов [Сукачев, 1966; Алексеев, 1990]. Особое внимание было уделено положению отдельных участков в рельефе. Пробные площадки, где проводили отбор почв и растений, закладывали с использованием почвенных карт, учетом господствующих ветров, рельефа местности, возраста и фаз развития растений, удаленности от автодорог (более чем на 300 м). Расстояние от пробной площадки до источника загрязнения определяли

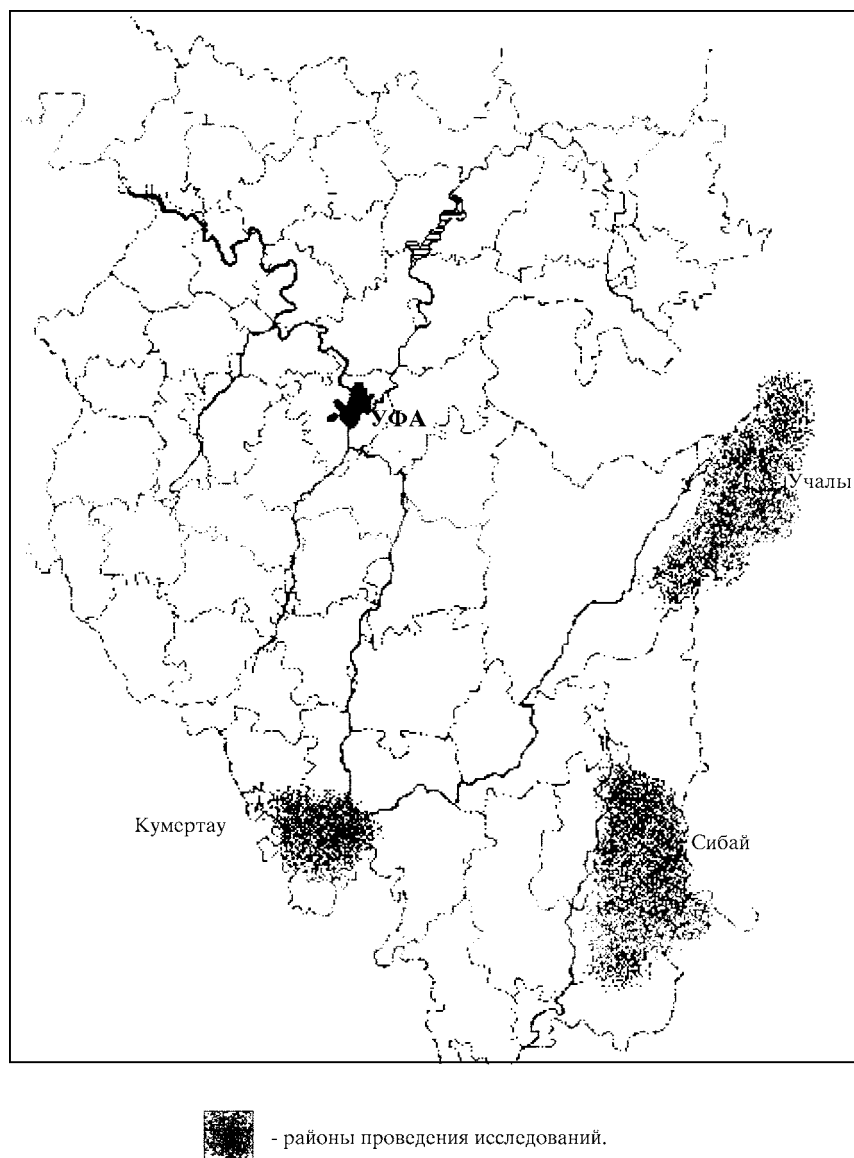


Рис. 1. Карта-схема республики Башкортостан

на основе ландшафтно-экологического принципа [Лукьянец, Шилова, 1979; Шилова и др., 1979; Шилова и др., 1984]. Согласно И.И. Шиловой и др. [1984], в зависимости от расположения источника техногенного загрязнения выделяются три зоны: 1) со значительным изменением природных геокомплексов, расстоя-

ние до 1,5–2 км от источника загрязнения; 2) с умеренным изменением природных геокомплексов, расстояние от 1,5–2 до 4–6 км; 3) с незначительным изменением природных геокомплексов; на расстояние от 4–6 до 8–12 км.

Объектами исследований были основные лесообразователи Южного Урала и России – растения, широко используемые при создании санитарно-защитных насаждений, – береза бородавчатая, тополь бальзамический, лиственница Сукачева и сосна обыкновенная.

Береза бородавчатая (*Betula pendula* Roth.). Сем. Betulaceae S.F. GRAY – Березовые, род *Betula* L. – Береза. Однодомное дерево высотой до 20 м, с белой корой (у старых деревьев у основания ствола черно-серая), нередко с повислыми ветвями, годовалые ветви красно-бурые. Образует насаждения чистые и смешанные с другими породами в лесной области и колки в лесостепной [Флора СССР, 1934]. Листопадное анемофильное дерево первой величины. Мезоксерофит, олиготроф, светолюбива, хотя и растет иногда в нижних ярусах древостоев, образованных светловойными и реже темнохвойными породами. Размножается семенами и порослью от пней.

Листорасположение очередное. Молодые листья голые, усеянные смолистыми бородавками. Листья треугольно-ромбические с усеченным или ширококлиновидным основанием, заостренной верхушкой и двоякоострозубчатым краем и без опушения. Высокоствольное однодомное дерево с темной грубой корой нижней частью ствола, цветет одновременное с облиствлением кроны [Определитель..., 1988].

Плод – односеменной орешек. Во взрослом состоянии корневая система косо уходящая вглубь или поверхностная. В первые годы развитие не очень быстрое, позже скорость роста увеличивается, особенно к 10–20 годам; рост как правило прекращается к 50–60 годам. Побегопроизводительная способность сохраняется до 60–80 лет, хотя к 40 годам уже значительно снижается. Плодоношение в насаждениях с 15–30 лет, у отдельно стоящих деревьев – с 7–10 лет; плодоношение обычно обильно и регулярно. Предельный возраст не превышает 100–120 лет. Древесина крепкая, упругая, среднетвердая.

Береза бородавчатая – вид полиморфный, неприхотлива к почве и вполне морозоустойчива. На участках, подверженных интенсивному выпасу скота, воздействию низовых пожаров и рубок, образует чистые или смешанные насаждения. Ритм развития находится в прямой связи с высотой произрастания в горах, шириной местности и других орографических факторов. Так, в южных районах Средней Сибири у нижней границы лесного пояса листья бе-

резь распускаются в середине мая, цветение происходит в конце мая, а семена созревают во второй декаде сентября. Число хромосом $2n = 28$ [Woodworth, 1929 цит. по Коропачинскому, 1983]. В культуре используется повсеместно в озеленении, защитном лесоразведении и лесном хозяйстве (Коропачинский, 1983).

Область распространения: Европейская часть России, Западная Сибирь, Алтай, Кавказ; Западная Европа. Береза бородавчатая растет одиночно, группами или в виде чистых насаждений на хорошо дренируемых почвах. В населенных пунктах разводится в садах и парках.

Береза бородавчатая – одна из главных лесообразующих пород, используемых при создании защитных насаждений, где растет как в колочных лесах и полезащитных насаждениях, так и на промплощадках. Береза считается неприхотливой к лесорастительным условиям породой, достаточно устойчивой к засушливым условиям Зауралья [Чурагулова, 1998]. Долговечна, хорошо растет при задымлении [Антипов, 1979]. Отличается высокой пластичностью, способна расти на солонцеватых почвах, типичных и корковых солонцах, где содержание Na^+ достигает 15%, Mg^{2+} – 30–40% емкости катионного обмена, а легкорастворимые соли, в основном сульфаты и бикарбонаты, находятся на глубине 30–80 см [Фрейберг, 1969]. В целом, данный вид оправдывает себя как один из основных при защитном лесоразведении в Зауралье [Чурагулова, 1998].

Тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) относится к роду *Populus* L. – Тополь, семейства Salicaceae Mirbel. – Ивовые [Определитель высших растений..., 1988]. Тополь бальзамический естественно распространен в Северной Америке. Растет в поймах рек, по береговым склонам, отмелям, на суглинистых и песчаных почвах; на вырубках и просеках встречается вместе с березой, осиной и елью, на равнинах с ивой и ольхой. В культуре распространен повсеместно. Дерево имеет высоту до 30 м. Мезофит, олиготроф, засухо- и морозоустойчив, малотребователен к почвам, светолюбивый, среднетеневынослив. Рост быстрый. Служит источником древесины; лекарственное, техническое и кормовое растение. Размножается семенами и черенками [Тахтаджян, 1966; Определитель..., 1988; Thomas, 1984].

Одной из особенностей тополей является то, что молодые побеги редко объедаются скотом. Это связано с горьким вкусом листьев и стеблей, в которых содержатся химические вещества, являющиеся репеллентами для травоядных животных [Определитель..., 1988; Кулагин и др., 2000; Thomas, 1984], что необходимо учитывать при лесной рекультивации выбитых пастбищных земель.

Тополь бальзамический является одним из наиболее устойчивых к газо- и пылевидным загрязнениям видом. Токсичные соединения в основном накапливаются в листьях, что приводит к заболеваниям – *хлорозам и некрозам*; их площадь в условиях загрязнения составляет 10–30%. В незагрязненных условиях основная масса листьев тополя бальзамического здорова. В органах тополя отмечается накопление таких металлов как стронций (Sr), кадмий (Cd), свинец (Pb), медь (Cu) и др. [Биоиндикация..., 1994; Гиниятуллин и др., 1999].

Тополя имеют большое значение при озеленении и защитном лесоразведении благодаря скорости роста, декоративности, сравнительно малой требовательности к условиям произрастания, легкости размножения [Кулагин и др., 2000]. Их рекомендуют применять для рекультивации нарушенных земель в зоне техногенного воздействия [Красинский, Побединская, 1950; Илькун, 1971; Чуваев и др., 1973; Антипов, 1979; Дашкевич, 1982; Белова и др., 1983; Борзенец, 1983; Бурцев, 1983; Баталов и др., 1991; Thomas, 1984].

Лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) – дерево из рода лиственница (*Larix* Mill) семейства сосновые (Pinaceae Lindl.). Дерево высотой до 50 м с продолжительностью жизни до 300–500 лет. Ствол покрыт толстой глубоко-бороздчатой корой, внутренние слои имеют фиолетово-бурый цвет. Форма дерева – пирамидальная с конусовидной кроной.

Лиственница – светолюбивая порода, не выносит затенения, для ее выращивания нужны глубокие, свежие почвы с достаточным количеством доступной влаги, с хорошей аэрацией, грунтовыми водами на глубине не менее 1,5–2,0 м.

Хвоя лиственницы светло-зеленая, узолинейная, у основания суженная, с тупой верхушкой, длиной 2–4 см, однолетняя. Побеги двух видов – удлиненные (ростовые) и укороченные. Удлиненные покрыты хвоинками, расположенными спирально (очередно) и сидящими одиночно на выступах. Каждый укороченный побег несет на себе пучок в 20–60 хвоинок. Укороченные побеги живут 10–12 лет, затем отмирают. Молодые побеги имеют желтовато-бурую окраску, которая с возрастом темнеет. Почки у лиственницы мелкие, яйцевидной или полушаровидной формы, покрыты многочисленными чешуями. Почки закладываются на вершинах побегов и в пазухах хвои удлиненных побегов. Однодомное раздельнополое растение [Дылис, 1947; Тимофеев, 1961; Поздняков, 1975; Тимофеев, 1977; Дылис, 1981; Schober, 1949].

Корневая система лиственницы поверхностно-стержнево-якорная (поверхностно-стержнево-гребенчатая) [Красильников,

1970] – стержневой и боковые корни хорошо развиты, хорошо выражены якорные корни (расположенные вблизи стержневого корня), основная масса боковых корней располагается в поверхностном горизонте почвы. Рост корней наблюдается в течение вегетационного периода на 10–12 суток дольше, чем растут побеги кроны.

В пределах республики Башкортостан лиственничники встречаются на Южном Урале и Уфимском плато [Кулагин, 1969; Баталов, Мартыанов, 1978; Putenikhin, Martinsson, 1995]. Лиственница Сукачева успешно произрастает в лесных культурах [Юлашев, Морозов, 1976] и санитарно-защитных насаждениях г. Уфы [Гетко и др., 1978; Баталов и др., 1981, 1984].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – дерево из рода сосна (*Pinus* L.) семейства сосновые (Pinaceae Lindl.). Дерево первой величины, достигает высоты 50 м (в среднем, 30 м), с высоко очищенным от ветвей прямым стволом. В нижней части ствол покрыт толстой красно-бурой корой с глубокими бороздами, в верхней части – гораздо более тонкой отслаивающейся пленкой [Жизнь растений, 1982]. Продолжительность жизни растений в естественных условиях достигает 300 и более лет [Флора СССР, 1934]. В первые годы жизни растения имеют конусовидную крону, которая в дальнейшем может иметь округлую, яйцевидно-округлую или зонтиковидную форму. Расположение ветвей на стволе – мутовчатое.

Сосна обыкновенная – светолюбивое растение, способное успешно развиваться в условиях недостатка влаги в воздухе и почве [Кабанов, 1977].

Хвоя сосны сизо-зеленая, плоско выпуклая, жесткая, на верхушках заостренная, по краям мелкопильчатая, расположена в пучках по две штуки, длина хвои 4–7 см и 2 мм толщиной [Чепик, 1985]. В разных частях кроны в зависимости от освещения наблюдаются различия в морфометрических характеристиках хвои [Побединский, 1979]. Продолжительность жизни хвои колеблется от двух до восьми лет [Правдин, 1964], в условиях смешанного, с преобладанием углеводородного, атмосферного загрязнения наблюдается уменьшение срока жизни хвои до двух – трех лет [Кулагин, 1974; Сметанина, 2000]. Опадает не одиночная хвоя, а целиком укороченный побег.

Сосна обыкновенная характеризуется наличием удлиненных и укороченных побегов, при этом ассимилирующая хвоя образуется лишь на укороченных побегах. Почка сосны удлинено-яйцевидные, острые, смолистые. Сосна обыкновенная является одностолбным раздельнополым растением [Ванин, 1956; Тахтаджян, 1956; Правдин, 1964; Чепик, 1985].

Следует отметить, что строение корневой системы зависит от условий произрастания: на среднеувлажненных и глубоких почвах формируется *поверхностно-стержневая корневая система* с хорошо развитыми стержневым и боковыми корнями, причем боковые расположены в основном в поверхностном слое почвы, и *поверхностно-стержнево-якорная*, имеющая вблизи стержневого корня ярко выраженные якорные корни. В то же время на болотах и почвах с близким залеганием грунтовых вод формируется *поверхностная корневая система* с мощным развитием поверхностных боковых корней, при этом стержневой корень часто отсутствует либо трудно идентифицируется) [Красильников, 1970]. Независимо от типов строения большая часть корневой системы располагается в верхнем 60-см слое почвы [Поликарпов, 1958; Рахтеенко, 1967; Шахова, 1976; Калинин, 1983; Ярмишко, Цветков, 1987; Калинин, 1989; Ярмишко, 1997; Зайцев, 2000; Roberts, 1976].

Сосна обыкновенная способна расти в разнообразных климатических условиях – от песков до болот, вне зависимости от глубины залегания грунтовых вод [Орлов, Кошельков, 1971]. Обладает широким диапазоном толерантности в отношении многих биотических и абиотических факторов [Кулагин, 1961; Правдин, 1964; Ярмишко, 1997; Оценка экологического..., 2001; Hanish, Kilz, 1990]. Отличается морозостойкостью, засухоустойчивостью, неприхотливостью к почвенно-грунтовым условиям, что позволяет ей продвигаться далеко на север и юг [Чурагулова, 1998]. Формирует разнообразные по составу, полноте и продуктивности чистые, а также смешанные с березой, осиной и другими породами, сосновые насаждения. В лесной и горно-лесной зонах образует обширные насаждения, а в лесостепной и степной – колючие. Частота встречаемости на севере Башкирского Зауралья (Учалинский район) выше по сравнению с южной частью региона (Хайбуллинский район). Сосна обыкновенная используется для лесоразведения. В Зауралье ее высаживают в полезащитные лесополосы, вокруг водохранилищ в колючие насаждения совместно с березой [Чурагулова, 1998]. В целом, эта хвойная порода светолюбива, характеризуется хорошей скоростью роста, нетребовательностью к почве (растет на каменистых, известковых и песчаных сухих почвах, на болотах, неплохо переносит засоленность почвы). К тому же установлено, что интенсивность формирования первичного гумусового горизонта высокой биохимической активности в молодых почвах техногенных ландшафтов под культурами сосны значительно выше, чем в зональных климаксовых целинных и, даже, в старопашотных почвах [Шугай, 1997].

На территории республики сосна обыкновенная встречается на всей территории в виде естественных массивов, а также в культуре в насаждениях санитарно-защитного назначения [Яфеев, 1975; Баталов и др., 1981, 1984; Зайцев, 2000].

Определение относительного жизненного состояния древостоев позволяет дать комплексную оценку их состояния под действием экологических факторов. В лесных насаждениях по общепринятым методикам [Сукачев, 1966] были заложены пробные площадки. На каждой такой площадке проводили учет деревьев, определяли диаметр и высоту отдельных деревьев. В культурах древесных растений, произрастающих в условиях полиметаллического загрязнения окружающей среды также проводили работу по оценке ОЖС. За основу была взята методика В.А. Алексеева [1990] с некоторыми изменениями применительно к лиственным древесным породам, в соответствии с их биологическими особенностями. В ходе пересчета с помощью бинокля (БПЦ 7 × 50) проводили визуальную оценку следующих диагностических признаков ОЖС: густоту кроны (в % от нормальной густоты), наличие на стволе мертвых сучьев (в % от общего количества сучьев на стволе) и степени повреждения листьев токсикантами, патогенами и насекомыми (средняя площадь некрозов, хлорозов и объеданий в % от площади листа).

ОЖС насаждений определяли по следующей шкале: здоровое насаждение, ослабленное, сильно ослабленное и полностью разрушенное. Для определения ОЖС деревьев была использована вспомогательная таблица 2, кроме того также рассчитывали объем стволов деревьев на пробной площади [Лесотаксационный справочник, 1980].

При определении ОЖС дерево относится к той категории, на которую указывает большинство исследуемых признаков – два из трех или все признаки. Нередко случается так, что все три показателя указывают на разные категории. В этом случае все они рассматриваются в комплексе, и выбирается наиболее оптимальная категория. Следует отметить, что при возникновении спорной ситуации наибольшее внимание уделяется повреждению листьев, а также разного рода повреждениям стволов: морозобойные трещины, раковые течи камеди, суховершинность, энтомопоражения (кладки яиц, стволовые заселения и т.д.), фитопатологические повреждения (образование на стволе плодовых тел грибов) и т.д. Характер и степень повреждения стволов могут в значительной степени определить категорию относительного жизненного состояния дерева.

После суммирования объемов стволов по категориям производится оценка относительного жизненного состояния всего на-

Таблица 2

Вспомогательная таблица для определения категорий деревьев

Категория дерева	Диагностические признаки		
	густота кроны	наличие мертвых сучьев	степень повреждения листьев
здоровое	85–100%	0–15%	0–10%
ослабленное	55–85%	15–45%	10–45%
сильно ослабленное	20–55%	45–65%	45–65%
отмирающее	0–20%	70–100%	70–100%
сухое	0%	100%	нет листьев

саждения по следующей формуле [Алексеев, 1990]:

$$L_v = \frac{100v_1 + 70v_2 + 40v_3 + 5v_4}{V},$$

где: L_v – ОЖС древостоя, рассчитанное с учетом крупности деревьев;

v_1 – объем древесины здоровых деревьев на пробной площади, в м³;

v_2, v_3, v_4 – то же для ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев соответственно;

100, 70, 40, 5 – коэффициенты, выражающие (в процентах) жизненное состояние здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев;

V – общий запас древесины на пробной площади, в м³ (включая объем сухостоя).

Расчет ОЖС древостоев можно проводить и по числу деревьев, если в насаждениях нецелесообразно определять объем стволов (в молодняках или из-за малого количества деревьев в куртине):

$$L_n = \frac{100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4}{N},$$

где: L_n – ОЖС древостоя, рассчитанное по числу деревьев;

n_1 – число здоровых деревьев на пробной площади;

n_2, n_3, n_4 – то же для ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев соответственно;

100, 70, 40, 5 – коэффициенты, выражающие (в процентах) жизненное состояние здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев;

N – общее число деревьев на пробной площади (включая сухостой).

При значении относительного жизненного состояния от 100 до 80% древостой оценивается как “здоровый”, при 79–50% – “ослабленный”, при 49–20% – “сильно ослабленный”, при 19% и ниже – “полностью разрушенный”.

Характер накопления и перераспределения тяжелых металлов в экосистеме в значительной мере зависит от особенностей почвенного и растительного покрова, а также уровня техногенной нагрузки. Почва аккумулирует поступающие загрязнители и может стать вторичным источником загрязнения приземного воздуха, природных вод, продукции растениеводства [Хазиев и др., 2000].

Необходимость определения содержания тяжелых металлов в почве имеет особое значение, так как обладая буферной емкостью, почва снижает подвижность металлов и тем самым уменьшает поступление их в растения [Ушаков и др., 2000; Хазиев и др., 2000]. В качестве индикации техногенного воздействия на объекты исследования нами выбран подход, основанный на сравнении концентрации тяжелых металлов в почвах и растениях зоны техногенного воздействия с показателями местного геохимического фона исследуемых металлов [Методические рекомендации..., 1987; Касимов и др., 1992; Добровольский, 1999]. Поэтому, помимо пробных, были выделены площадки условного контроля, приравненного к местному биогеохимическому фону. Они имели однотипные размеры, включали аналоги почв, растений и были расположены с учетом тех же условий на расстоянии, недоступном влиянию горнообогатительных комбинатов. Такая условно чистая зона находится на удалении 30 км от источника загрязнения.

Интенсивность и состояние загрязнения черноземов тяжелыми металлами определяли при помощи коэффициента аномальности (K_a), равного отношению среднего значения концентрации металла в загрязненной почве (C') к природной норме, геохимическому фону (C_n): $K_a = C'/C_n$ [Добровольский, 1999].

Для экотоксикологической оценки почв мы использовали кратность превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) тяжелых металлов по их валовым и подвижным формам [Система оценки..., 1992]. При этом учитывалась группа токсичности каждого металла (класс опасности по ГОСТ 17.4.1.02-83) (табл. 3).

Полученные результаты сравнивали с региональным геохимическим фоном (РГФ) степных почв Башкирского Зауралья для валовых и подвижных форм Cu, Zn, Cd [Оценка экологическо-

Таблица 3

**Характеристика элементов по классу опасности
(по ГОСТ 17.4.1.02-83)**

Класс опасности	Элемент
1 (высокий)	As, <u>Cd</u> , Hg, Pb, Se, <u>Zn</u>
2 (умеренный)	Co, Ni, Mo, <u>Cu</u> , Sb, Cr
3 (малый)	Ba, V, W, Mn, Sr

Таблица 4

Оценочные показатели содержания металлов в почвах (мг/кг)

Привязка	Cu	Zn	Pb	Cd
ПДК	23/2	85/23	32/6	1,5/0,24
РГФ	49/1,5	223/3,1	20/0,2	0,15/0,01
Фон для черноземов	25/–	68/–	20/–	0,24/–
Примечание. Валовые формы / подвижные формы				

го..., 2001] и фоновым содержанием изучаемых металлов в черноземах [Яковлев и др., 1993] (табл. 4).

Интенсивность поглощения металлов древесными породами оценивалась с помощью коэффициента аккумуляции K_a [Биоиндикация загрязнения..., 1988].

В случае, если на пробной площадке отсутствовал искомый вид растительности, его отбирали с отклонением в сторону от трансекты, но не более чем на 1 км, с сохранением установленного расстояния от соответствующего источника загрязнения.

Всего в процессе полевых работ было взято 228 объединенных проб почвы и растений. Отбор и подготовку к анализу почвенных и растительных образцов осуществляли по общепринятым методикам [Сукачев и др., 1957; Зырин, Обухов, 1977].

Для анализа содержания отдельных элементов в почвах и растениях отобранные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, затем готовили навески (по 2,0 г). Содержание элементов в растительных образцах и почвогрунтах определяли в аналитической лаборатории Института геологии РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой – ICP-MS (PLASMA QUAD PQ2-TURBO PLUS, USA). Содержание отдельных элементов выражалось как массовая доля примесей – в частях на 1 млн (ppm).

Моделирование экологической катастрофы, с целью исследования особенностей изменения основных биометрических показателей растений, дает представление об их потенциальной устойчивости и механизмах выживания растений в условиях стресса. Решение этой задачи потребовало проведения дополнительных вегетационных экспериментов. Исследования проводили на растениях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), поскольку данный вид является одним перспективных и широко используемых при создании санитарно-защитных насаждений. Опытные растения, выращивали из древесных черенков, заготовленных в пойме р. Демы в конце января, – в период глубокого физиологического покоя (локальные источники загрязнения окружающей среды отсутствуют). Пол деревьев не определяли. Длина черенков – $25 \pm 0,5$ см, диаметр – $4,5 \pm 1$ мм, количество почек 7–8 [Комиссаров, 1964; Плотникова, Хромова, 1981; Мак-Милан Броуз, 1987]. Черенки выращивали в тепличных условиях при средней влажности воздуха $65 \pm 2\%$, температуре окружающей среды $22,0 \pm 0,8$ °С, при естественном фотопериоде. Температуру и влажность измеряли каждый день в течение эксперимента. Дыхание листьев определяли по методу Варбурга [Баславская, Трубецкова, 1964] с использованием аппарата Варбурга (WARBURG-APPARAT VEB GLASWERKE STUTZEBACH, Germany). Пигменты в листьях определяли по методу Wintermans, De Mots [Малый..., 1994]. Содержание пигментов определяли на спектрофотометре SPECOL 21 (Poland).

Экспериментальные работы проводили в песчаной и водной культуре.

Песчаная культура. Черенки выращивали в вегетационных сосудах с песком в течение 60 сут. После формирования зеленой массы и корневой системы растения были обработаны растворами солей сублетальной концентрации: KCH_3COO , NaCH_3COO , $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ – 10 г/л (1%-й раствор) и $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ – 2 г/л (0,2%-й раствор). Различия в концентрациях солей обусловлены неодинаковой фитотоксичностью металлов – медь и свинец являются наиболее токсичными металлами по отношению к растениям по сравнению с другими [Устойчивость..., 1991; Рыбальский и др., 1989а; 1989б; Физиология..., 1989; Загрязнение..., 1988; Махонина, 1987]. Ацетаты металлов растворяли в дистиллированной воде (все соли являются водорастворимыми) и поливали растения, произрастающие в вегетационных сосудах – по 0,5 л в каждый сосуд. Растворами каждой из десяти солей поливали 20 растений в 10 вегетационных сосудах. Таким образом, в общей сложнос-

ти было обработано 200 растений в 100 вегетационных сосудах. Обработка растений растворами солей металлов осуществляли однократно. Далее, по ходу эксперимента, растения поливали дистиллированной водой по мере необходимости. В качестве контрольных были использованы растения, поливаемые дистиллированной водой на протяжении всего эксперимента.

Этот эксперимент являлся попыткой воссоздания условий, в которых растения произрастают в естественной среде и подвергаются действию повышенных доз металлов при аварийном их выбросе в окружающую среду, в том числе и при избыточном содержании металлов в растительном субстрате. Следует отметить, что ацетат-ионы являются наименее токсичными для растений по сравнению с другими анионами [Кулешова, 1965; Царева, 1988; Калинин, 1989; Кагарманов, 1995] и не оказывают значительного влияния на развитие растений. Таким образом, токсический эффект, наблюдаемый при действии солей металлов, вызывается по большей части ионом металла.

Растения выращивали в течение 60 сут. до обработки и 30 сут. после обработки растворами солей металлов. Такая продолжительность эксперимента обусловлена тем, что в естественных условиях в конце вегетационного периода физиологические процессы в растениях значительно замедляются.

Повреждения листьев опытных растений тополя бальзамического в течение эксперимента оценивали визуально. На рисунках и в тексте представлены средние данные относительно количества пораженных листьев, а также площади хлорозных и некротических пятен.

Через каждые трое суток по ходу эксперимента отбирали образцы листьев для определения дыхания и содержания пигментов.

По окончании эксперимента листья опытных и контрольных растений отбеливали в хлорсодержащем отбеливающем растворе “Белизна” (одна часть раствора: две части воды) в течение 13–15 часов, а затем готовили временные препараты и микроскопировали для определения длины жилок и количества устьиц на листьях. Длину жилок на единице поверхности определяли в различных частях листа (апикальной, срединной и базальной) с последующим усреднением. Для измерения длины жилок использовали окуляр 4/0,11. Количество устьиц на единице поверхности листа подсчитывали в нижней его части, для подсчета использовали окуляр 16/0,40. Измерения и подсчеты проводили с использованием микроскопа Amplival (Carl Zeiss Jena, Germany). В тексте представлены данные анатомо-морфологических показателей в следующих величинах: длина жи-

лок – в мм на 1 мм² листовой пластинки (мм/мм²), количество устьиц на 1 мм² (шт/мм²).

В конце эксперимента были отобраны образцы листьев контрольных и опытных растений для изучения морфологических изменений, вызванных действием различных металлов. Прежде всего, делали высежки из листьев (верхняя часть, средняя часть и основание листа), затем фиксировали высежки в парафине по общепринятой методике [Паушева, 1974]. После фиксации делали срезы листьев и микроскопировали их. Толщину слоев листьев определяли с помощью окуляр-микрометра (40/0,65) микроскопа Amplival (Carl Zeiss Jena, Germany). В тексте данные о толщине слоев приведены в микрометрах (мкм).

Для характеристики корневых систем опытных и контрольных растений определяли следующие параметры: массу корневых систем, длину корней первого порядка и количество корней первого порядка. Массу корневых систем определяли в воздушно-сухом состоянии с помощью лабораторных весов Zakłady mechaniki precyzyjnej (Gdansk, Poland) с точностью до 0,01 г, длину корней первого порядка измеряли штангенциркулем с точностью до 0,5 мм.

Водная культура. Черенки помещали в растворы солей сублетальной концентрации: KCH₃COO, NaCH₃COO, Ca(CH₃COO)₂, Ba(CH₃COO)₂, Mg(CH₃COO)₂, Mn(CH₃COO)₂, Zn(CH₃COO)₂ – 10 г/л (1%-й раствор) и Cu(CH₃COO)₂, Pb(CH₃COO)₂ – 2 г/л (0,2%-й раствор). Ацетаты металлов растворяли в дистиллированной воде и разливали в вегетационные сосуды по 0,5 л в каждый. Растворы солей разливали в 10 вегетационных сосудов, после чего помещали в них по два черенка. Таким образом, на каждой из солей выращивали по 20 растений. В качестве контрольных были использованы растения, выращенные на дистиллированной воде.

Данный эксперимент повторял условия, в которых растения произрастали в естественной среде, находясь под постоянным техногенным прессом в виде токсичных выбросов металлов, в том числе при избыточном их содержании в субстрате.

В вегетационных сосудах поддерживали постоянный объем раствора (0,5 л), доливая дистиллированную воду два раза в неделю.

Растения выращивали в течение 65 сут. Такая продолжительность эксперимента связана с тем, что растения, выращиваемые на средах с содержанием солей металлов, начали погибать.

По ходу эксперимента, через день, с помощью штангенциркуля измеряли размеры (длина и ширина) всех распустившихся листьев. Площадь листьев рассчитывали по формуле: $S = 1/2 d_1 d_2$, где d_1 – длина листа, d_2 – ширина листа.

В конце эксперимента были отобраны образцы листьев для определения дыхания и содержания пигментов.

Все измерения проводили не менее, чем в десяти повторностях. Математическая обработка полученных данных производилась с помощью статистического пакета Microsoft Excel 2000. На рисунках и в таблицах представлены средние арифметические данные и ошибки среднего значения [Плохинский, 1970].

МЕТАЛЛЫ: РОЛЬ В ЖИЗНИ ЖИВОТНЫХ И РАСТЕНИЙ, ФИТОТОКСИЧНОСТЬ

КАЛИЙ

Характеристика элемента. Элемент I группы Периодической системы. Атомный номер 19. Природные изотопы: ^{39}K (98,08%), ^{41}K (6,91%), ^{40}K (0,01%). Последний изотоп радиоактивен ($T_{1/2} = 1,32 \cdot 10^9$ лет). Щелочной металл. К – мягкий металл, его можно прессовать и прокатывать в холодном состоянии; легко режется ножом, сохраняет пластичность при низких температурах [Бандман и др., 1988; Вредные..., 1988].

Содержание в природе. Важнейшие минералы К: сильвин KCl – 52,4% К; карналлит $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 35,8% К; каинит $\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 14% К; лангбейнит $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ – 18,8% К. Входит в состав полевых шпатов и слюд. Содержание К в земной коре 2,5%; в почве 1,36 (1,1 в песчаниках; 2,28 в сланцах и глинах); в морской воде 0,038; в фитомассе 0,3; в организмах животных 0,27%. Средняя распространенность К в железомарганцевых конкрециях Мирового океана 0,64%. Содержание К в речной воде $1,5 \cdot 10^{-4}\%$. К, как и Na, Ca, Mg, относится к группе главных ионов (макрокомпонентов) химического состава природных вод, соединения которых хорошо растворяются в водной среде. Главными природными источниками поступления К в поверхностные пресные воды являются изверженные горные породы и продукты их химического разложения. Ввиду того, что К принадлежит к числу элементов, легко выносимых из горных пород, значительное его количество поступает в водоемы в результате растворения хлор- и серосодержащих соединений, карбонатов [Бандман и др., 1988].

Зольный состав растений по К (в% к массе золы) следуют: водоросли – 5–18,2, лишайники до 10,0, мхи – 8,0, папоротники – 35,4, хвощи – 11,2; грибов – в среднем 28,4, [Вредные..., 1988].

Роль калия в жизни животных и человека

Калий является биогенным элементом животных и человека. Суточная потребность взрослого человека в калии – два–три г – покрывается за счет мяса и растительных продуктов. У грудных

детей суточная потребность калия составляет 30 мг/кг и полностью покрывается за счет материнского молока, содержание калия в котором 60–70 мг%. Многие морские организмы способны извлекать калий из воды. У животных содержание калия составляет, в среднем, 2,4 г/кг. Следует отметить, что К сосредоточен, главным образом, в клетках, во внеклеточной среде его гораздо меньше. В клетках калий распределен неравномерно. Ионы калия участвуют в генерации и проведении биоэлектрических потенциалов в нервной и мышечной тканях, поддерживают осмотическое давление и гидратацию коллоидов в клетках, активируют деятельность ряда ферментов. Метаболизм К тесно связан с углеводным обменом, ионы калия оказывают влияние на биосинтез белков. Ионы калия в большинстве случаев нельзя заменить на другие ионы. Угнетение гликолиза, дыхания, фотосинтеза, нарушение проницаемости наружной клеточной мембраны приводят к выходу калия из клеток, часто в обмен на натрий. Выделяется калий из организма, главным образом, с мочой. Содержание калия в крови и тканях позвоночных регулируется гормонами надпочечников – кортикостероидами [Бандман и др., 1988; Вредные..., 1988].

Значение калия в жизни растений

Калий является одним из самых необходимых для растений макроэлементов.

В растениях калий в максимальных количествах сосредоточен в молодых, растущих тканях, которые характеризуются высоким уровнем обмена веществ. В растительных клетках около 80% К содержится в вакуолях. Он служит основным противоионом для нейтрализации отрицательных зарядов неорганических и органических анионов. Следует отметить, что присутствие К в значительной степени определяет коллоидно-химические свойства цитоплазмы. Калий способствует поддержанию состояния гидратации коллоидов цитоплазмы, регулируя ее водоудерживающую способность. Увеличение гидратации белков и водоудерживающей способности цитоплазмы повышает устойчивость растения к засухе и заморозкам. Калий необходим для поглощения и передвижения воды по растению – работа “нижнего концевой двигателя” на $\frac{3}{4}$ обусловлена присутствием ионов калия в пасоке. Важнейшее значение играет калий в открывании и закрывании устьиц. Присутствие калия обуславливает наличие мембранного потенциала клеток. Калий является элементом-активатором более 60 различных клеточных ферментов, например, таких как, дегидрогеназы [Микроэлементы..., 1980; Вредные..., 1988].

Следует отметить, что при снижении уровня содержания К в клетках растений увеличивается содержание ионов натрия, магния, кальция, свободного аммиака, ионов водорода и минеральных фосфатов. При недостатке калия аммиачное питание приводит к излишнему накоплению NH_4^+ и отравлению растения [Растения..., 1983]. В то же время отмечается, что при недостатке калия растения не усваивают аммиачный азот, растения отравляются и погибают [Власюк и др., 1974]. Калий благотворно действует на образование хлорофилла, способствует поддержанию тургора в растительных клетках, уменьшает величину транспирационного коэффициента, улучшает водный режим в растениях.

Большое скопление углеводов в листьях, как известно, задерживает фотосинтез. Калий способствует усвоению углекислоты из воздуха, принимает участие в синтезе, накоплении и транспорте углеводов из листьев к корням и другим органам растения [Власюк и др., 1974; Двораковский, 1983].

О. Девидсон и П. Юдкинс [1957] показали, что у персика (*Persica vulgaris* Mill.), который поглощает относительно большое количество K^+ , при малейшем недостатке последнего в доступной форме в почве наблюдаются симптомы калийного голодания: сморщивание листовой пластинки, закручивание листьев, появление на поверхности темно-зеленых с багровым оттенком участков. С.Д. Фоу с соавторами [1978] отмечали появление ободка бурой засыхающей ткани ("ожог" листьев) у смородины (*Ribes aureum* Pursh.) или образование ободка фиолетового цвета на листьях крыжовника (*Grossularia rectinata* L. Mill.); со временем происходит почернение таких листьев по краям.

Использование промышленно-бытовых сточных вод для орошения земельных участков приводит к повышению содержания калия в редисе (*Raphanus sativus* L.) и моркови (*Daucus carota* L.) до уровней 277,2 и 263,7 мг%, соответственно (в контроле 226,8 и 173,2 мг%) [Вредные ..., 1988].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания калия в окружающей среде

Влияние повышенных концентраций калия на рост и развитие древесных растений было изучено на примере тополя бальзамического в условиях вегетационного опыта. Исследования особенностей развития ассимиляционного аппарата и корневых систем тополя стали основой для анализа влияния сублетальных концентраций ионов калия на развитие древесных растений.

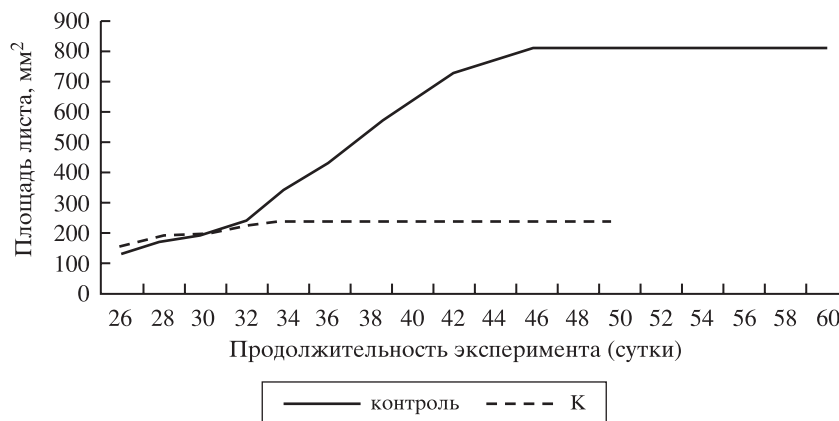


Рис. 2. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях избыточного содержания ацетатов K^+ в среде (водная культура)

Установлено, что при действии ионов калия у 80% экспериментальных растений раскрылись все почки (контроль – 100%). Следует также отметить, что первые листья появляются на опытных растениях через четверо суток после их обработки растворами солей калия (контроль – шесть суток). Несмотря на ускорение развития ассимиляционного аппарата в самом начале его вегетации в дальнейшем происходит торможение роста листьев тополя (рис. 2). Продолжительность и интенсивность роста листьев тополя под действием ионов калия характеризуются как незначительные, поскольку средняя суммарная площадь листьев 20 опытных растений не превышает 30% аналогичного показателя контрольных экземпляров. Кроме того, продолжительность роста листьев при обработке растений растворами солей калия в среднем в два раза меньше, чем в контроле – 10 сут против 20 сут, соответственно.

Развитие корневой системы тополей, выращенных в водной культуре при засолении среды ацетатами K^+ , характеризуется следующими особенностями – корневая система имеется у 100% растений, а появление первых зачатков корней обнаруживается только через 37–43 сут после начала эксперимента. Для сравнения – у всех контрольных растений первые зачаточные корни обнаружены на четверо сут. В условиях песчаной культуры отмечаются изменения развития корневых систем опытных растений относительно контроля, что выражается в увеличении общей массы корневых систем в среднем на 40%, увеличении длины корней первого порядка на 10% при равном их количестве – 17 шт. (контроль и опыт).

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием калия

При увеличении содержания ионов калия в растительном субстрате отмечается появление видимых повреждений ассимиляционных органов растений. Так, было показано, что водные растворы ацетатов калия (сублетальные дозы) способствуют появлению хлорозных и некротических пятен на листьях тополя бальзамического (рис. 3). Следует отметить, что пораженными оказались, в среднем, до 10% листьев всех экспериментальных растений, при этом наибольшее количество пораженных листьев на одном растении составило 15%, но были единичные экземпляры, на листьях которых повреждения обнаружены не были.

Установлено, что в ходе вегетационного эксперимента в песчаной культуре изменялось соотношение площади повреждений в виде хлорозных и некротических пятен. Показано, что площадь хлорозов увеличивалась в первую и вторую декады эксперимента, в третьей декаде наблюдалось постепенное увеличение площади некрозов. В целом, площадь пораженных участков не превышала 60% площади листовой пластинки экспериментальных растений.

При выращивании растений в водном растворе KCH_3COO на листьях отмечено появление следующих повреждений – хлорозы – у 43%, некрозы – у 16%, усыхание – у 7% листьев от общего количества распутившихся листьев. Из общего количества хло-

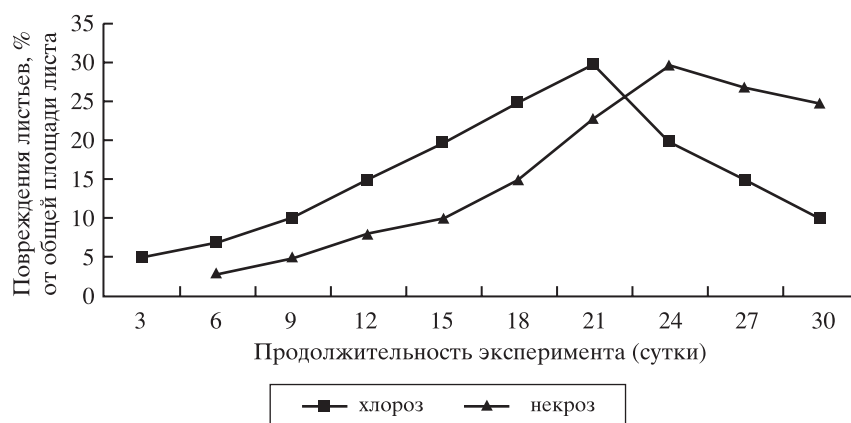


Рис. 3. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата K^+ (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

розов, наибольшая доля по центральной жилке – 28%, межжилковых – 10%, краевых – 5%. Повреждения в виде некрозов отмечены только по центральной жилке. Скручивание листьев не обнаружено. Следует отметить, что у 65% листьев опытных растений тополя были отмечены различные повреждения ассимиляционного аппарата.

Анатомо-морфологические особенности растений при действии калия

В вегетационных экспериментах в песчаной культуре было установлено, что избыток ионов калия способствует снижению длины жилок на листьях тополя бальзамического. Так, длина жилок в верхней, средней и нижней части листьев опытных растений составила $0,71 \pm 0,02$, $0,71 \pm 0,02$ и $0,70 \pm 0,01$ мм/мм² соответственно, против $0,82 \pm 0,01$, $0,86 \pm 0,02$ и $0,87 \pm 0,02$ мм/мм² в контроле. Среднеарифметическое значение длины жилок на листьях экспериментальных растений было значительно меньше, чем в контроле – $0,71 \pm 0,01$ и $0,85 \pm 0,01$ мм/мм². Вместе с тем, среднее относительное количество устьиц на листьях опытных растений превосходило контрольное значение на 83 шт. и составило 528 шт/мм².

Исследование структурных особенностей листьев тополя позволили установить отсутствие достоверных различий толщины верхней и нижней кутикулы в апикальной, срединной и базальной частях листьев опытных растений относительно контроля. В то же время показано, что толщина губчатой и столбчатой паренхимы достоверно превосходят аналогичные показатели для всех участков листьев контрольных растений в среднем на 10%. Толщина верхнего и нижнего эпидермиса в срединной части листьев контрольных растений несколько больше относительно опытных растений. Однако в апикальной и базальной частях листьев картина противоположная – толщина эпидермиса в среднем на 15% выше у экспериментальных образцов по сравнению с контролем. Благодаря значительному увеличению толщины наиболее массивных слоев листьев (губчатой и столбчатой паренхимы) опытных растений, общая толщина их листьев после обработки водными растворами ацетатов калия увеличивается, в среднем, на 10% относительно контроля.

Экофизиологические эффекты при действии калия на древесные растения

Установлено, что под действием ионов калия изменяется интенсивность дыхания листьев и содержание основных пигментов фотосинтеза в листьях тополя бальзамического (рис. 4–8). Так, в условиях хронического загрязнения (в водной культуре), дыхание листьев опытных растений не превышало 30% от общего значения дыхания листьев в контроле. Дыхание листьев экспериментальных растений составило $184,2 \pm 12,7$ мкл O_2 /г сырой массы $\times$ ч, контрольное значение при этом составляло $649,7 \pm 22,5$.

После однократной обработки тополей растворами с повышенным содержанием ионов K^+ на 6–9-е сутки эксперимента наблюдается резкое снижение дыхания листьев опытных растений по сравнению с контролем. Затем дыхание листьев опытных и контрольных растений постепенно выравнивается. На 24-е сут. наблюдается повторное понижение дыхания листьев опытных растений, но к концу эксперимента значения дыхания листьев контрольных и опытных растений достоверно не отличаются.

Помимо исследований дыхания листьев тополей проводили оценку изменений содержания основных пигментов фотосинтеза в листьях опытных и контрольных растений. Результаты этих работ представлены на рис. 5–8.

При действии K^+ на растения тополя содержание хлорофилла А в листьях изменяется по сравнению с контролем следующим образом; уже на третьи сутки наблюдалось резкое снижение содержания пигмента в листьях опытных растений. По ходу эксперимента отмечались скачкообразные изменения содержания хлорофилла А в листьях опытных растений. Следует отметить, что полного восстановления количества хлорофилла А в листьях опытных растений к концу эксперимента не происходит.

Увеличение содержания ионов K^+ в растительном субстрате приводит к резкому увеличению содержания хлорофилла В в листьях опытных растений уже на третьи сутки эксперимента. На 6–15-е сут. отмечалось постепенное снижение содержания пигмента в листьях опытных растений. Но на 18-е сут. происходит повторное увеличение содержания хлорофилла В и уровень пигмента в листьях контрольных и опытных растений становится одинаковым. Затем отмечались скачкообразные изменения содержания пигмента в листьях опытных растений – 21–30-е сут. Следует отметить, что к концу эксперимента содержание хлоро-

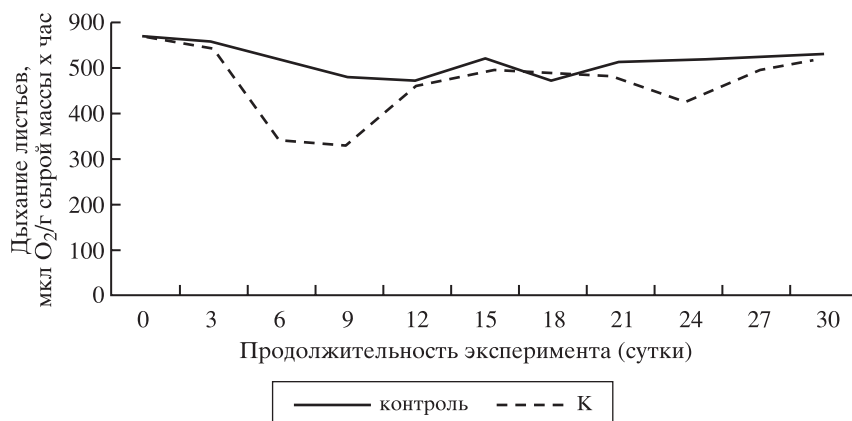


Рис. 4. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов K^+ (песчаная культура)

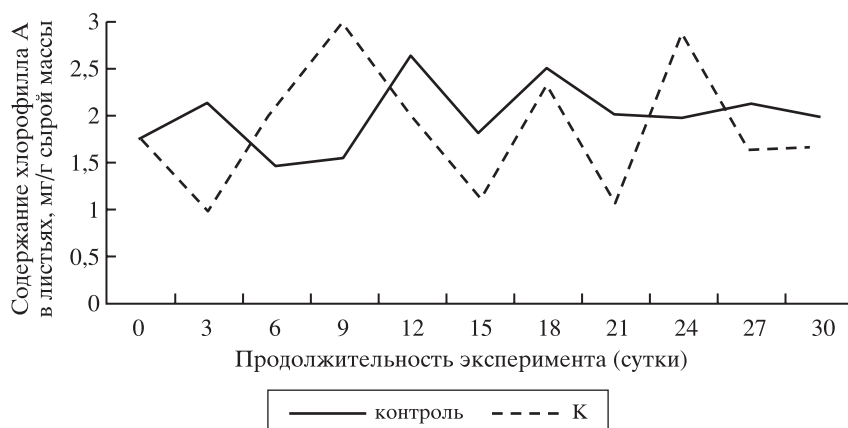


Рис. 5. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения K^+ (песчаная культура)

филла В в листьях опытных растений несколько ниже, чем в листьях контрольных растений.

Ионы K^+ оказывают крайне негативное влияние на содержание каротиноидов в листьях тополя – на третьи сут. эксперимента содержание пигмента в листьях опытных растений было значительно ниже по сравнению с контрольными показателями. На 6-е и 9-е сут. было отмечено значительное повышение содержа-

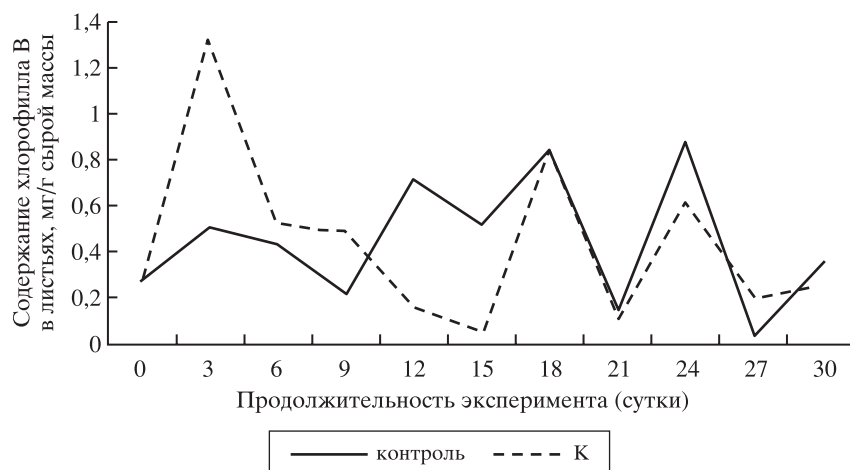


Рис. 6. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения K^+ (песчаная культура)

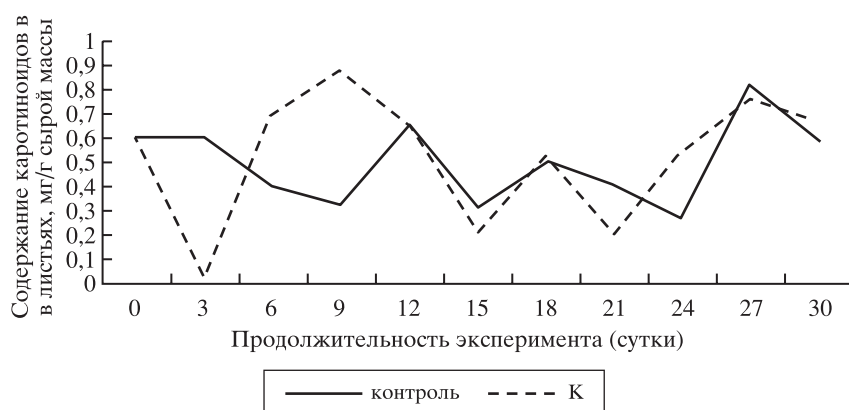


Рис. 7. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения K^+ (песчаная культура)

ния каротиноидов в листьях опытных растений в отношении контрольных. Затем происходила временная нормализация содержания пигмента в листьях опытных растений – 12-е и 18-е сут., однако на 21–30-е сут. происходит снижение содержания каротиноидов в результате действия ионов калия на растения тополя бальзамического.

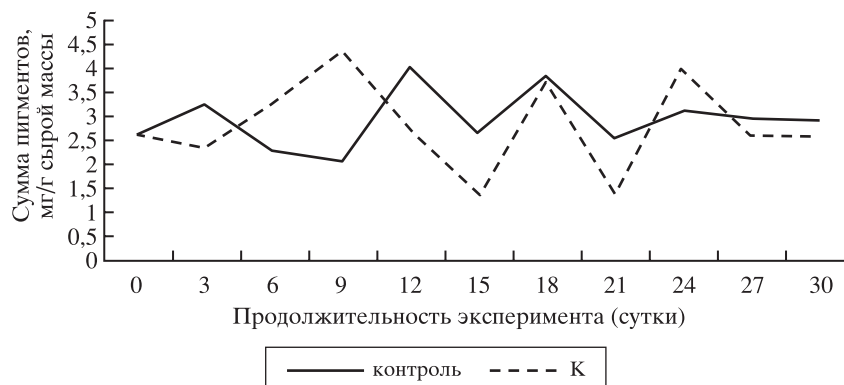


Рис. 8. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения K⁺ (песчаная культура)

В результате действия ионов K⁺ изменения содержания суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях тополя бальзамического наблюдаются на третьи сут. эксперимента — отмечается снижение содержания пигментов в листьях опытных растений по сравнению с контрольными. Затем отмечено резкое увеличение количества пигментов в листьях опытных растений (6-е и 9-е сут. эксперимента), после чего происходит повторное снижение (12-е и 15-е сут.) и постепенная нормализация (18-е сут.) содержания пигментов фотосинтеза в листьях опытных растений относительно контроля. Во второй половине эксперимента наблюдали скачкообразные изменения содержания пигментов в листьях опытных растений, и концу эксперимента количество пигментов в листьях контрольных растений было выше, чем в листьях опытных растений.

В условиях водной культуры также происходят изменения содержания пигментов фотосинтеза в листьях тополя под действием ионов K⁺. Так, отмечалось значительное снижение количества хлорофилла А и каротиноидов в листьях опытных растений по сравнению с контролем — $0,1682 \pm 0,0125$ ($0,4726 \pm 0,0041$) и $0,0824 \pm 0,0003$ мг/г сырой массы ($0,1726 \pm 0,0009$) соответственно. При этом содержание хлорофилла В в листьях опытных образцов превосходило содержание этого пигмента в контроле — $0,4108 \pm 0,0072$ и $0,2879 \pm 0,0042$ мг/г сырой массы листа. Средне суммарное количество пигментов в опыте было на 1/3 меньше, чем в контроле.

НАТРИЙ

Характеристика элемента. Элемент I группы периодической системы. Атомный номер 11. Природный изотоп ^{23}Na . Щелочной металл. Пластичен, легко режется ножом [Бандман и др., 1988].

Содержание в природе. Общее число минералов натрия – 222. Главные из них, являющиеся источниками Na и его соединений: галит (каменная соль) NaCl , чилийская селитра NaNO_3 , тенардит Na_2SO_4 , мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, трона $\text{NaH}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Содержание Na в земной коре 2,5–2,6%; в почвах 0,63 (в песчаниках 0,33; в сланцах и глинах 0,66); в морской воде 1,06; в растениях 0,02; в организмах животных 0,1%. Содержание Na в овощах (мг%): картофель (*Solanum tuberosum* L.) 37, морковь (*Daucus carota* L.) 65, редис (*Raphanus sativus* L.) 26. Содержание Na^+ в талых водах, полученных из снежного покрова в Антарктиде 0,003–2,0 мг/л, на окраинах Москвы 0,9–5,1 мг/л, из снега на Южном и Северном полюсах 0,76–3,9 мг/л [Вредные..., 1988; Karlsson et al., 1985].

Роль натрия в жизни животных и человека

Na – один из основных элементов, участвующих в минеральном обмене животных и человека. Содержится, главным образом, во внеклеточных жидкостях (в эритроцитах человека – 10 ммоль/кг, в сыворотке крови 143 ммоль/кг); участвует в поддержании осмотического давления и кислотно-щелочного равновесия, в проведении нервных импульсов. Суточная потребность человека в хлористом натрии колеблется от 2 до 10 г и зависит от потери этой соли с потом. Концентрация Na в организме регулируется в основном гормоном коры надпочечников – альдостероном [Вредные..., 1988].

Значение натрия в жизни растений

У галофитов натрий создает высокое осмотическое давление в клеточном соке и тем самым способствует извлечению воды из почвы. Одним из источников значительных поступлений Na в почву и затем в пищевую цепь являются промышленно-бытовые сточные воды. При использовании для выращивания моркови (*Daucus carota* L.) промышленно-бытовых сточных вод, содержащих в осадке Na в количестве 175–185 мг/кг, в корнеплодах обнаруживается 76 мг% (в контроле 65 мг%). Сточные воды промышленной переработки калийно-магниевых руд содержат до 90%

хлорида Na и, попадая в пресные воды, увеличивают в них концентрацию Na до сотен и тысяч мг/л. Значительное количество Na попадает в почву при использовании хлорида Na в качестве средства против обледенения поверхности шоссейных дорог. В местностях, где Na используется для смягчения природных вод, уровень его в питьевой воде также возрастает [Craun, 1984; Вредные..., 1988].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания натрия в окружающей среде

В условиях избыточного содержания ионов натрия в окружающей среде у растений тополя бальзамического раскрываются до 85% почек. При этом наблюдается значительное замедление распускания первых листьев – задержка происходит на 9 сут. (эксперимент – 15 сут., контроль – 6 сут.). Динамика роста листьев, выражающаяся в увеличении площади листовой пластинки, показана на рис. 9.

Установлено, что продолжительность роста листьев опытных растений значительно меньше по сравнению с аналогичными показателями для контрольных растений. При этом площадь листьев опытных образцов не превышает 30% площади листьев контрольных растений тополя.

Развитие корневой системы экспериментальных растений, выращенных в водной культуре, может быть охарактеризовано как незначительное по сравнению с контролем. При избытке в среде ацетатов Na появление первых корней у 100% растений было отмечено лишь на 33 сут. (контроль – 4 сут.). При вы-

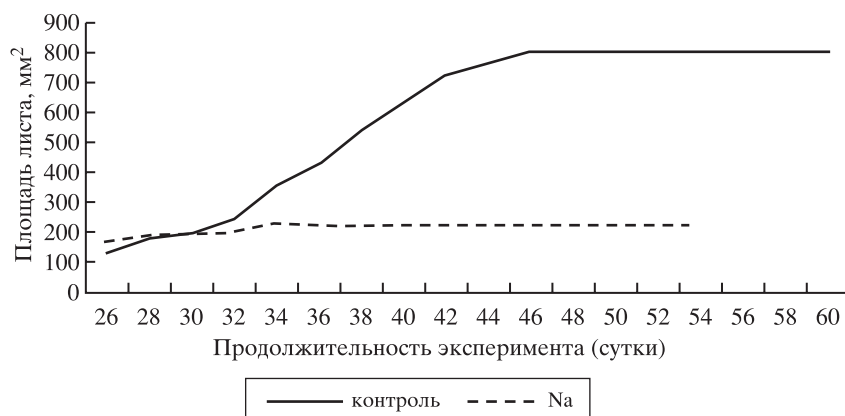


Рис. 9. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Na (водная культура)

рацивании растений в песчаной культуре были получены следующие данные, характеризующие развитие корневых систем тополя: количество корней первого порядка – опыт 15 шт. (контроль – 17 шт.), общая длина корней первого порядка – для опыта и контроля это значение составляет в среднем 125 см, общая масса корневой системы одного черенка – опыт – 0,8 г (контроль – 0,9 г).

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием натрия

Результатом воздействия ионов натрия, находящихся в растительном субстрате в избытке, является повреждения ассимиляционных органов тополя бальзамического. Установлено, что в течение 24-х сут. площадь хлорозов и некрозов листьев постепенно увеличивалась, затем наблюдалось резкое снижение площади хлорозов при сильном увеличении площади некрозов (рис. 10).

В условиях водной культуры лишь 50% листьев тополя остаются “здоровыми”, т.е. не имеют видимых повреждений. Следует отметить, что листья экспериментальных растений повреждались неравномерно – у 30% листьев отмечались хлорозы, в том числе краевые – 10%, по центральной жилке – 20%, некрозы – у 5% листьев (только краевые). Повреждения листьев в виде усыхания составили 15% от общего количества распустившихся листьев. Скручивание листьев не обнаружено.

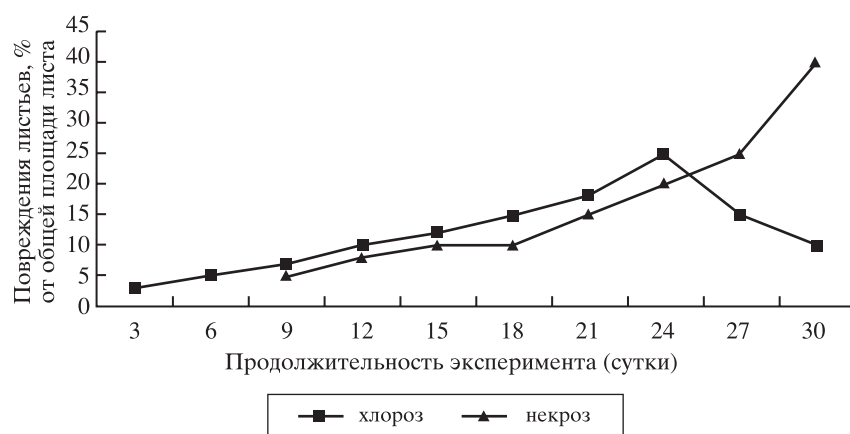


Рис. 10. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Na^+ (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

Анатомо-морфологические особенности растений при действии натрия

В экспериментальных условиях (песчаная культура) были установлены изменения ряда анатомических и морфологических показателей листьев тополя под действием натрия. Относительное количество устьиц на листьях в опыте было на 138 шт. меньше, чем в контроле и составило 307 шт/мм². Длина жилок на листьях тополя после обработки растений солями натрия колеблется в пределах от $0,69 \pm 0,03$ у основания листа, до $0,80 \pm 0,02$ мм/мм² в апикальной части, при этом среднее значение составляет $0,76 \pm 0,02$ мм/мм², что несколько меньше по сравнению с контролем – $0,85 \pm 0,01$ мм/мм².

Исследования анатомических изменений, происходящих в листьях тополей после действия на них ионов натрия позволили установить, что общему 5%-му увеличению общей толщины листьев способствует увеличение толщины столбчатой и губчатой паренхимы в апикальной, срединной и базальной частях листьев в среднем, на 5–10%. Отмечается также 15%-е увеличение толщины нижнего эпидермиса в срединной и базальной частях листьев опытных растений по сравнению с контрольными значениями. Установлено, что толщина кутикулы и верхнего эпидермиса у контрольных листьев, в среднем, на 10% превосходят соответствующие показатели опытных образцов.

Экофизиологические эффекты при действии натрия на древесные растения

Показано, что ионы Na⁺ оказывают влияние на дыхание листьев уже на третьи сутки после однократной обработки тополей – происходит некоторое увеличение дыхания. Далее, по ходу эксперимента наблюдается снижение дыхания у этих растений (6 и 9-е сут.), затем увеличение дыхания и на 15-е сут. дыхание листьев опытных и контрольных растений выравнивается. На 21 и 27-е сут. значение дыхания листьев опытных растений несколько уменьшается относительно контрольного значения, но к концу эксперимента между уровнями дыхания листьев опытных и контрольных растений достоверных различий не обнаружено (рис. 11).

В условиях длительного загрязнения окружающей среды с повышенным содержанием ионов натрия отмечается значительное снижение дыхания листьев опытных растений относительно контроля – $152,6 \pm 5,9$ и $649,7 \pm 22,5$ мкл O₂/г сырой массы х ч, соответственно. Следует отметить, что дыхание листьев экспери-

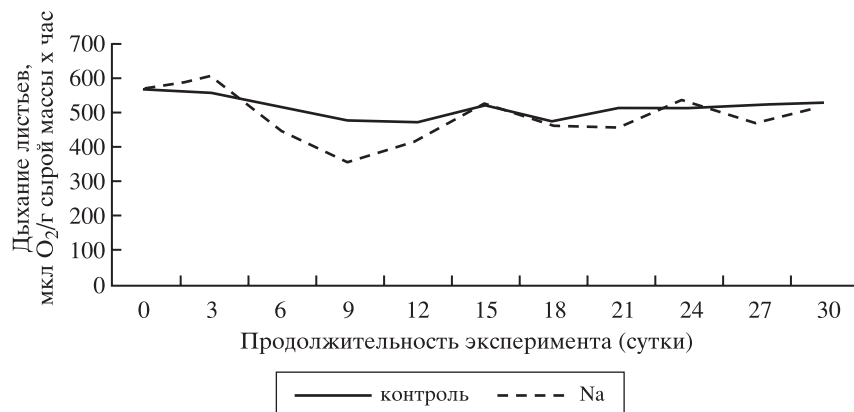


Рис. 11. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Na⁺ (песчаная культура)

ментальных растений при хроническом загрязнении в течение вегетационного периода не восстанавливается.

В результате действия ионов Na⁺ изменения в содержании хлорофилла А наблюдаются на третьи сутки эксперимента – отмечается незначительное увеличение хлорофилла А в листьях опытных растений по сравнению с контрольными. Затем наблюдается резкое снижение количества хлорофилла А в листьях опытных растений на 6–15-е сут., после чего происходит постепенная нормализация (18–30-е сутки) содержания пигмента в листьях опытных растений относительно контроля (рис. 12).

При изучении характера действия Na⁺ на содержание хлорофилла В в листьях тополя, установлено, что на третьи сутки происходит снижение, затем на 6-е сут. отмечается увеличение содержания хлорофилла В. Нормализация содержания хлорофилла В в листьях опытных растений отмечается на 9-е, 18-е и 27-е сут. эксперимента – достоверных различий между содержанием пигмента в листьях контрольных и опытных растений не обнаружено. На 12-е и 15-е сут. отмечалось снижение, на 21-е и 24-е сут. – повышение уровня содержания пигмента в листьях опытных растений. В конце эксперимента отмечено повышенное содержание хлорофилла В в листьях растений, подверженных действию Na⁺ по сравнению с контрольными растениями (рис. 13).

Содержание каротиноидов в листьях тополя изменяется уже на третьи сутки эксперимента после обработки растений ацетатом Na⁺ (сублетальная концентрация) – отмечается повышение содержания каротиноидов до 9-х сут. эксперимента. В период с

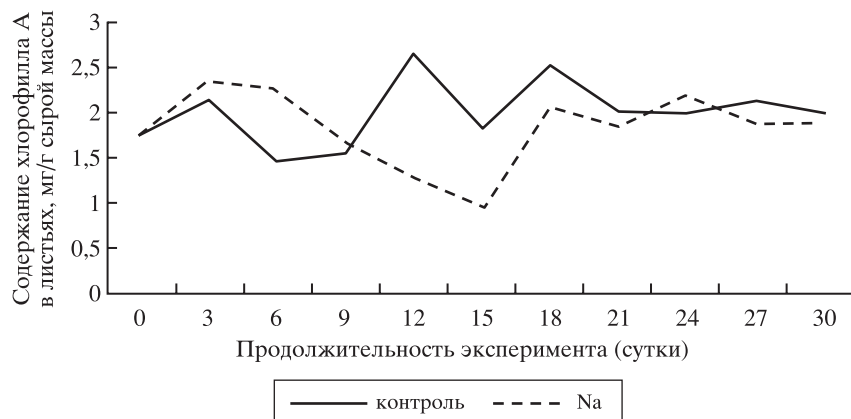


Рис. 12. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Na^+ (песчаная культура)

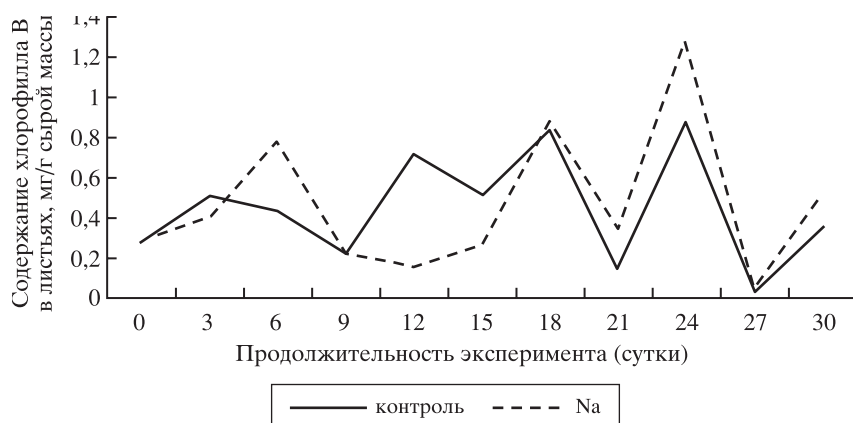


Рис. 13. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии растения Na^+ (песчаная культура)

12-х сут. по 21-е происходит постепенное снижение содержания каротиноидов в листьях опытных растений, на 24-е и 27-е сут. – наблюдается увеличение содержания каротиноидов. К концу эксперимента, (на 30-е сут.) содержание каротиноидов в листьях опытных растений было несколько выше относительно соответствующего показателя контрольных растений (рис. 14).

Резкое увеличение содержания ионов Na^+ в растительном субстрате приводит к повышению содержания суммы пигмен-

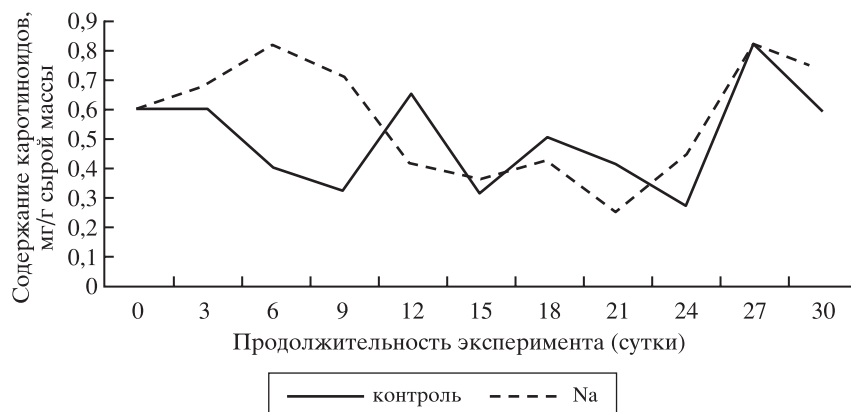


Рис. 14. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Na^+ (песчаная культура)

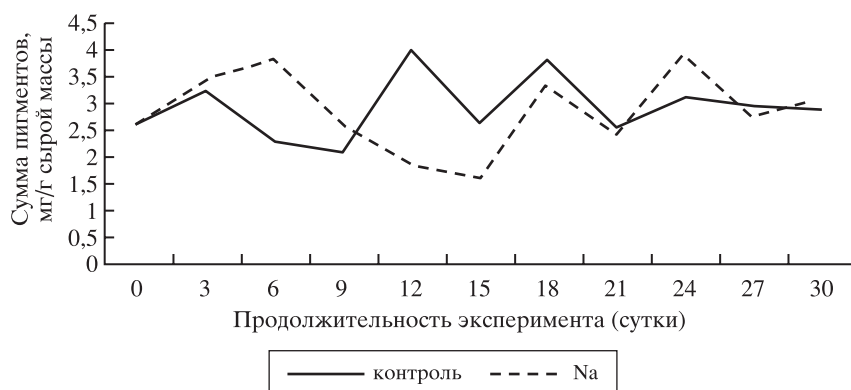


Рис. 15. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Na^+ (песчаная культура)

тов в листьях опытных растений на 6-е и 9-е сут. эксперимента. На 12–18-е сут. отмечается пониженное, по сравнению с контролем, содержание суммы пигментов в листьях опытных растений тополя. К концу эксперимента происходит нормализация содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях опытных растений – достоверных различий между содержанием пигментов в листьях опытных и контрольных растений не обнаружено.

В условиях хронического загрязнения отмечается 10%-ое снижение количества суммы пигментов фотосинтеза в листьях

опытных растений за счет снижения содержания хлорофилла В и каротиноидов – $0,2061 \pm 0,0154$ ($0,2879 \pm 0,0042$) и $0,0871 \pm 0,0059$ ($0,1726 \pm 0,0009$) мг/г сырой массы листа. При этом количество хлорофилла А в листьях опытных растений было больше относительно контроля – $0,5369 \pm 0,0021$ и $0,4726 \pm 0,0041$ мг/г сырой массы листа.

КАЛЬЦИЙ

Характеристика элемента. Элемент II группы периодической системы. Атомный номер 20. Природные изотопы: ^{40}Ca (96,94%), ^{42}Ca (0,647%), ^{43}Ca (0,135%), ^{44}Ca (2,09%), ^{46}Ca (0,003%), ^{48}Ca (0,187%). Щелочноземельный металл. Существует в двух аллотропных модификациях. Пластичен, хорошо прессуется и может быть прокатан в листы. Хорошо поддается обработке резанием [Вредные..., 1988].

Содержание в природе. По распространенности в земной коре Са занимает пятое место (после О, Si, Al, Fe); содержание – 2,96%. Са активно мигрирует и накапливается в различных геохимических системах, образуя 385 минералов. Большая часть Са заключена в полевом шпате. При высоком содержании CO_2 в водах Са находится в растворе, а при низком в осадок выпадает минерал кальцит CaCO_3 , образуя залежи известняка, мела, мрамора. Другие основные минералы: ангидрит CaSO_4 , гипс $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, флюорит CaF_2 , апатит $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{F}, \text{Cl})$. Реки приносят в океан много Са, но он не задерживается в океанической воде (0,04%), а концентрируется в скелетах различных организмов и после их гибели осаждается на дно преимущественно в форме CaCO_3 . Важную роль в миграции Са играют подземные воды (карст). В природных водах Европейской части СССР содержится 67,2 мг/л Са. В живом веществе из элементов-металлов Са – главный. Известны организмы, которые содержат больше 10% Са, строящие свой скелет, главным образом, из CaCO_3 (известковые водоросли, моллюски, кораллы, иглокожие и др.) [Вредные..., 1988].

Роль кальция в жизни животных и человека

Кальций является одним из биогенных элементов, необходимых для роста и развития животных организмов. Он присутствует во всех тканях животных. Содержание кальция у некоторых организмов может достигать 38%, у человека колеблется в пределах 1,4–2%. Основную массу кальция животные получают с пищей и

водой. Са необходим для образования ряда клеточных структур, поддержания нормальной проницаемости наружных клеточных мембран, для оплодотворения яйцеклеток рыб и других животных, а также активации ряда ферментов. Ионы кальция передают возбуждение на мышечное волокно, вызывая его сокращение (в том числе увеличивают силу сердечных сокращений), повышают фагоцитарную активность лейкоцитов, активируют систему защитных белков крови, участвуют в свертывании крови. В клетках почти весь Са находится в связанном виде – с белками, нуклеиновыми кислотами, фосфолипидами, в комплексах с неорганическими фосфатами и органическими кислотами. В плазме крови человека и высших животных не более 40% Са связано с белками. Содержание Са в крови человека и высших животных регулируется гормонами паращитовидных и щитовидной желез. У животных, обладающих скелетом, до 99% всего Са используется в качестве строительного материала: у беспозвоночных в основном в виде CaCO_3 (раковины моллюсков, кораллы), у позвоночных – в виде фосфатов. Отмечается, что многие беспозвоночные запасают Са перед линькой для построения нового скелета или обеспечения жизненных функций в неблагоприятных условиях. Всасывание Са происходит в переднем отделе тонкого кишечника. Усвоение Са ухудшается при снижении кислотности в кишечнике и зависит от соотношения Са, Р и жира в пище. Известно, что желчные кислоты ускоряют всасывание Са. Выделение Са происходит, главным образом, через кишечник. Млекопитающие в период лактации теряют очень много Са с молоком. При нарушениях фосфорно-кальциевого обмена у молодых животных и детей развивается рахит, у взрослых особей – изменение состава и строения скелета – остеопороз [Вредные ..., 1988].

Значение кальция в жизни растений

Са (как и элементы К, Мп, Fe, S) относится к макроэлементам. Са в наибольших количествах накапливается в старых органах и тканях. Са выполняет многообразные функции в растительных клетках, которые связаны с влиянием на структуру мембран, перестройками цитоскелета, процессами поляризации клеток и тканей. Кальций активирует ряд ферментов – дегидрогеназу, липазу, фосфатазу и др. Именно Са чаще всего выступает в роли балансового иона при создании физиологической уравновешенности ионного состава среды, так как его содержание в почве достаточно большое [Растения..., 1983].

Повышенное содержание солей кальция в почве негативно сказывается на развитии большинства древесных растений. На

почвах с высоким содержанием карбонатов Са проявляется физиологическая сухость. На засоленных почвах нарушается микотрофное питание и доступ кислорода к поверхности всасывающих корней, происходит “известкование” чехлика и связывается фосфор. Вследствие сухости почвы и дефицита фосфора наблюдается суховершинность и преждевременный выпад древесных растений [Власюк и др., 1974].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания кальция в окружающей среде

Развитие листьев экспериментальных растений тополя при действии ионов натрия характеризуется как незначительное, несмотря на то, что уже на вторые сутки эксперимента на опытных растениях появляются первые листья. Во-первых, при выращивании черенков в водных растворах не более чем у половины растений раскрылись все почки; во-вторых, продолжительность роста листьев опытных растений составила 8 сут.; в-третьих, средняя площадь листьев опытных растений составила не более 40% от средней площади листьев контрольных растений (рис. 16), в-четвертых, у всех опытных растений первые корни были обнаружены на 25-е сут. эксперимента, у контрольных – на 4-е сут.; в-пятых, количество и длина корней первого порядка у экспериментальных растений меньше по сравнению с контролем – 14 и 17 шт., 100 и 125 см, соответственно. Однако масса корневых систем опытных и контрольных растений достоверно не различалась.

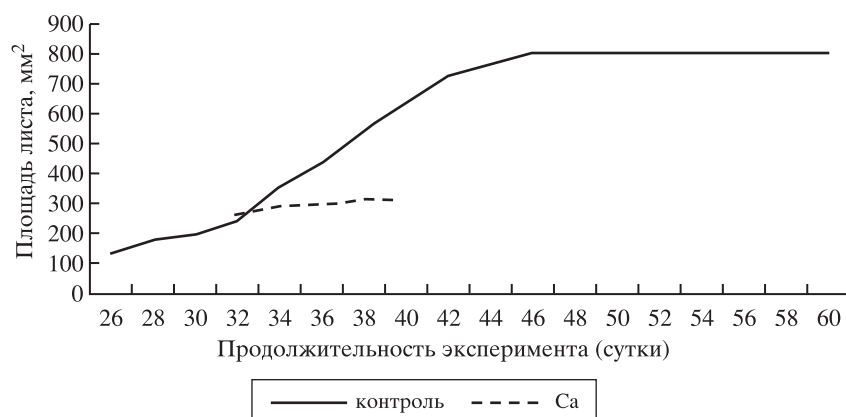


Рис. 16. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Ca^{2+} (водная культура)

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием кальция

В условиях вегетационного эксперимента в водной культуре на листьях растений, выращенных при избыточном содержании $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ появляются повреждения в виде хлорозов по центральной жилке и скручиваний – у 60% и 20% листьев экспериментальных растений, соответственно. Установлено, что на 80% листьев всех растений тополя обнаруживаются видимые повреждения.

Повреждения листьев растений после однократной обработки показаны на рис. 17.

Следует отметить факт увеличения площади хлорозов по отношению к площади некрозов на листьях опытных растений тополя в ходе эксперимента.

Анатомо-морфологические особенности растений при действии кальция

При действии ионов кальция на растения тополя бальзамического происходит снижение количества устьиц и длины жилок на листьях опытных растений на 15% относительно контроля. Кроме того, отмечаются изменения толщины отдельных слоев листьев. Так, было показано, что достоверно увеличивается толщина губчатой и столбчатой паренхимы во всех частях листьев экспериментальных растений по сравнению с контролем. Отмечается также увеличение толщины нижнего эпидермиса в срединной и базальной части листьев и нижней кутикулы – в срединной ча-

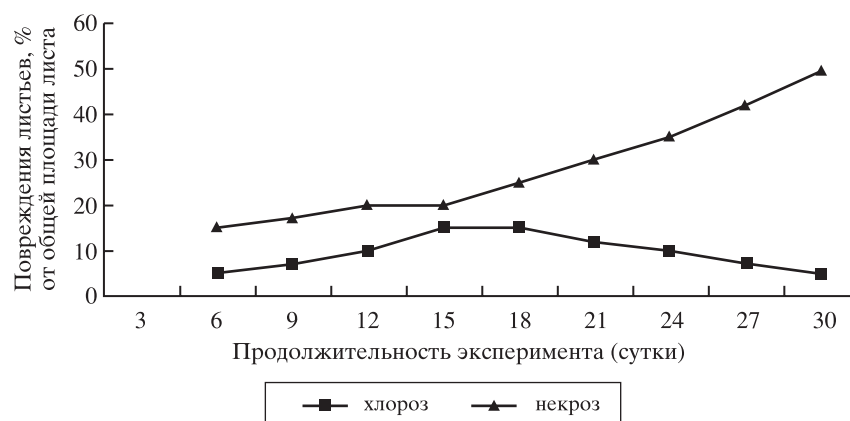


Рис. 17. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Ca^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

сти. При этом достоверных различий между значениями толщины верхней кутикулы и верхнего эпидермиса во всех частях листьев в контроле и опыте не установлено. Средняя суммарная толщина листьев опытных растений на 15% больше соответствующего показателя для контроля.

Экофизиологические эффекты при действии кальция на древесные растения

В условиях водной культуры при действии на растения тополя ионов кальция наблюдается сходный с калием эффект снижения дыхания листьев опытных растений до значения $184,1 \pm 6,5$ мкл O_2 /г сырой массы $\cdot$ ч. Вместе с тем значение дыхания листьев опытных растений было $649,7 \pm 22,5$. Изменения дыхания листьев тополя в песчаной культуре показаны на рис. 18.

При действии ионов Ca^{2+} на растения тополя бальзамического отмечается постепенное снижение – 3,6 и 9-е сут., затем резкое увеличение – 12 и 15-е сут. и повторное снижение – 18–27-е сут. эксперимента показателя дыхания листьев относительно контрольных значений. Следует отметить, что на 30-е сут. происходит некоторое увеличение показателя дыхания листьев опытных растений, однако это значение гораздо ниже соответствующего показателя контрольных растений.

Ионы Ca^{2+} обуславливают изменения содержания основных пигментов фотосинтеза в листьях растений (рис. 19–22).

Содержание хлорофилла А в листьях тополя не изменяется вплоть до 12-х сут. эксперимента после обработки растений аце-

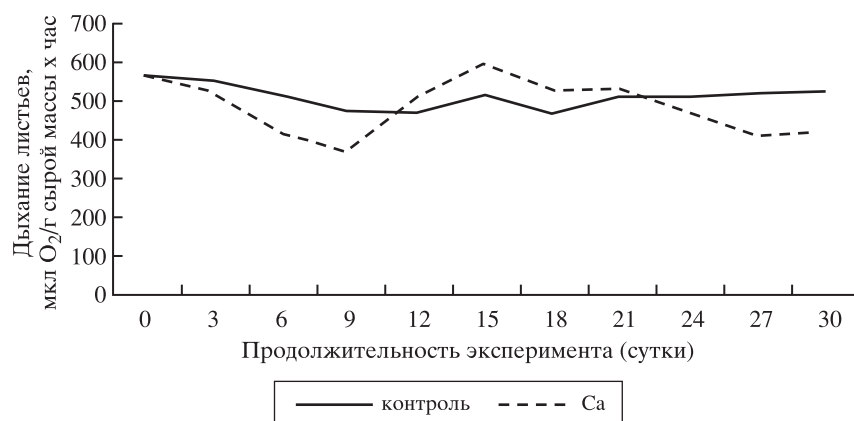


Рис. 18. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Ca^{2+} (песчаная культура)

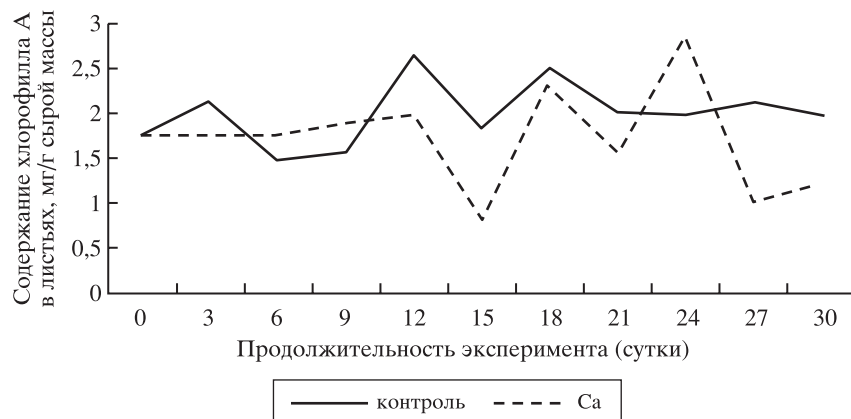


Рис. 19. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ca^{2+} (песчаная культура)

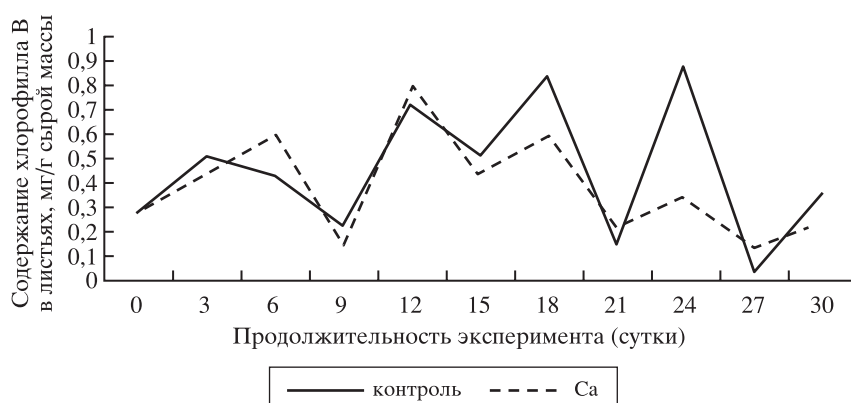


Рис. 20. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ca^{2+} (песчаная культура)

татом Ca^{2+} (сублетальная концентрация). Однако на 15-е сут. происходит резкое снижение содержания хлорофилла А в листьях опытных растений. Затем наблюдаются скачкообразные изменения содержания пигмента в листьях опытных растений – 18–27-е сутки эксперимента.

Содержание хлорофилла В в листьях тополя бальзамического после однократного действия сублетальных концентраций Ca^{2+} снижается на третьи сутки, повышается на 6-е сут. и и

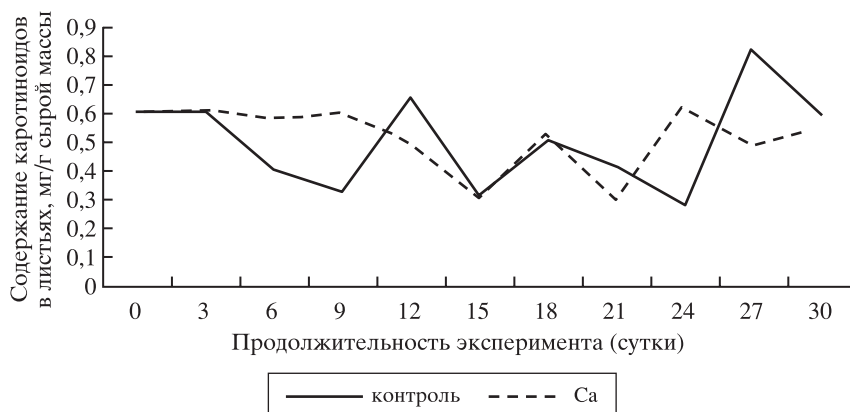


Рис. 21. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ca^{2+} (песчаная культура)

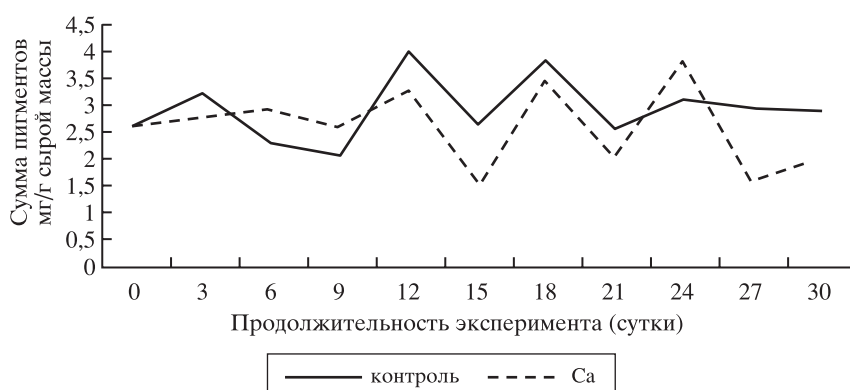


Рис. 22. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ca^{2+} (песчаная культура)

вновь снижается на 9-е сут. по сравнению с контролем. Отмечается, что на 12-е сут. эксперимента значение содержания пигмента в листьях опытных растений несколько выше по сравнению с контролем. Затем происходит снижение уровня хлорофилла В в листьях опытных растений – 15–24-е сутки и увеличение – на 27-е сут. эксперимента. Содержание хлорофилла В в листьях опытных растений выше относительно контрольных к концу эксперимента.

В результате действия ионов Ca^{2+} наблюдаются изменения содержания каротиноидов в листьях опытных растений на 6–12-е, а также на 21–27-е сут. эксперимента по сравнению с контрольными показателями. К концу эксперимента достоверных различий между содержанием каротиноидов в листьях опытных и контрольных растений не установлено.

При изучении характера действия Ca^{2+} на содержание суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях тополя, установлено, что большую часть эксперимента количество пигментов в листьях контрольных растений было выше, чем в листьях опытных растений. На 30-е сут. эксперимента содержание пигментов в листьях контрольных было значительно выше соответствующего показателя опытных растений.

При хроническом загрязнении окружающей среды ионами Ca^{2+} отмечается снижение содержания всех пигментов фотосинтеза и, как следствие, суммы пигментов более, чем на 80% относительно контроля.

БАРИЙ

Характеристика элемента. Элемент II группы периодической системы. Атомный номер 56. Природные изотопы: ^{130}Ba (0,101%), ^{132}Ba (0,097%), ^{134}Ba (2,42%), ^{135}Ba (6,59 %), ^{136}Ba (7,81%), ^{137}Ba (11,32%), ^{138}Ba (71,66%). Щелочноземельный металл. Ba тверже свинца, но мягче цинка [Бандман и др., 1988].

Содержание в природе. Содержание Ba в земной коре 0,065%. Основные природные минералы – барит (или тяжелый шпат) и виверит. Воды Мирового океана содержат до 28770 млн т Ba при средней концентрации 21 мкг/л. Средняя концентрация в речной воде 20 мкг/л, а глобальный годовой вынос в океан с речным стоком – 740 тыс. т. Годовой захват Ba, растворенного в океане, железомарганцевыми конкрециями превышает 11 тыс. т. Среднее содержание Ba в почвах мира 0,05%. В биомассе планеты содержится 3 млрд т Ba, из них 56 млн т – в наземной растительности; $K_6 = 0,66$. Захват Ba годовым приростом фитомассы Земли составляет 25,9 кг на 1 км² поверхности. Содержание Ba в сухой массе бурых водорослей составляет $31 \cdot 10^{-4}\%$. В морских водорослях содержится 3,0 г/100 г сухого вещества, в наземных растениях – 1,4, морских животных 0,02–0,3, наземных животных – 0,075; бактериях – 18–90 мг Ba на 100 г сухой массы [Вредные ..., 1988].

Роль бария в жизни животных и человека

Отмечается, что для животных барий и его соли ядовиты, поэтому травы, содержащие много бария вызывают у травоядных животных отравления. Барий откладывается в костях и в незначительных количествах в других органах животных и человека. У человека доза бария 0,2–0,5 г вызывает острое отравление, а 0,8–0,9 г – смерть. ПДК бария в воде, используемой в бытовых целях – 4 мг/л [Вредные ..., 1988].

Значение бария в жизни растений

Установлено, что Ва присутствует практически во всех органах растений, его содержание в золе растений зависит от его количества в почве и колеблется от 0,06–0,2% до 3%. Ва может поступать в почву с пестицидами и удобрениями, накапливаясь затем в растениях – до 5 мг/кг. Коэффициент накопления Ва (содержание Ва в золе/содержание Ва в почве) у травянистых растений составляет 0,2–6, у древесных – 1–30. Концентрация Ва больше в корнях и ветвях, меньше – в листьях; она увеличивается по мере старения побегов. [Растения ..., 1983; Бандман и др., 1988; Вредные ..., 1988].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания бария в окружающей среде

Результатом влияния ионов бария на растения тополя бальзамического стало сильное угнетение роста листьев (рис. 23) на фоне очень высокого процента их распускания (95%) и совпадения

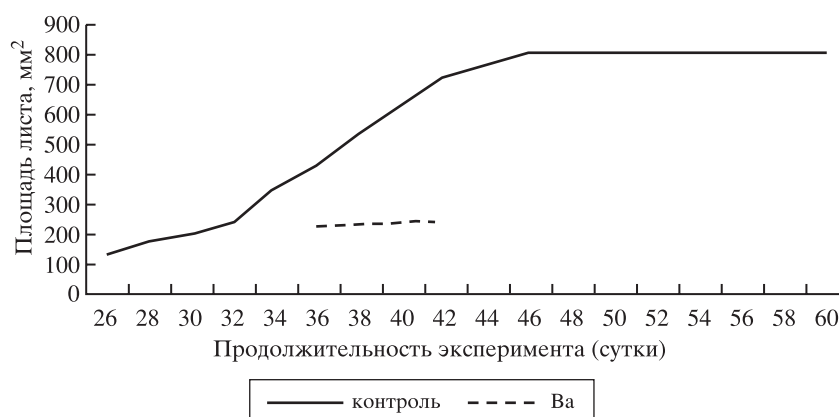


Рис. 23. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Ва²⁺ (водная культура)

по срокам процессов распускания, которые по времени заняли и у опытных растений, и у контрольных по 6 сут. Короткий период роста и небольшое значение площади листьев опытных растений сочетаются со слабым развитием корневой системы тополей в условиях водной культуры – первые корни были обнаружены на 25 сут. эксперимента (контроль – 4 сут.), которые так и остались в зачаточном состоянии.

При однократной обработке растений водными растворами ацетата бария отмечается двукратное снижение общей массы корневой системы опытных растений в сравнении с контрольными, при этом показатели количества корней первого порядка и их общей длины остаются неизменными под действием металла.

Аккумуляция бария в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

В результате анализа содержания бария в различных органах древесных растений было установлено, что листья березы бородавчатой аккумулируют значительно меньше данного металла по сравнению с многолетними частями растений при произрастании в карьере и на отвалах хромитового месторождения. Противоположная картина наблюдается при произрастании березы в контроле и на отвалах марганцевого и золоторудного месторождения (табл. 5).

В органах сосны обыкновенной при произрастании на отвалах марганцевого месторождения наблюдается равномерное распределение бария, в то время, как у растений, развивающихся на отвалах золоторудного месторождения, барий присутствует лишь в коре (табл. 5).

Анализ почвогрунтов показал, что отвальные породы хромитового месторождения содержат несколько меньше бария по сравнению с фоновым значением, при этом содержание металла в отвальных грунтах марганцевого месторождения более, чем в два раза превышает соответствующий показатель для контроля (табл. 6).

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием бария

До 90% листьев тополя бальзамического, выращенных при избыточном содержании Ba^{2+} в окружающей среде являются поврежденными в различной степени. Среди видимых повреждений следует выделить хлорозы по центральной жилке (до 10% пло-

Таблица 5

**Содержание бария (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Ba
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	5,1
	Внешний слой коры	8,9
	Внутренний слой коры	16
	Древесина	35
	Корень	67
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	5,5
	Внешний слой коры	21
	Внутренний слой коры	81
	Древесина	–
	Корень	4,7
Контроль оз. Узункуль	Листья	137
	Кора	32
	Древесина	36
	Корень	25
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	55
	Кора	20
	Древесина	47
	Корень	107
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	80
	Внешний слой коры	54
	Внутренний слой коры	79
	Древесина	26
	Корень	101
<i>Pinus sylvestris</i> L. (Сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	35
	Кора	33
	Древесина	37
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	0
	Кора	37
	Корень	0

Таблица 6

**Содержание бария (ppm) в почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Ва
Карьер Красовского хромитового месторождения	98
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	253
Контроль оз. Узункуль	112

щадии листьев), некрозы – 30%; краевой – 20% и диффузные некрозные пятна по всей поверхности листовой пластинки – до 10%, а также скручивание – отмечалось у 50% от общего количества поврежденных листьев.

На рис. 24 показаны изменения повреждений листьев при выращивании тополей в растворах с избыточным содержанием солей бария.

Установлено, что в первые две недели вегетационного эксперимента площади хлорозов и некрозов постоянно увеличивались причем площадь хлорозов несколько превосходила площадь некрозов. Во второй половине эксперимента наблюдалось резкое снижение площади хлорозов при продолжающемся увеличении площади некрозов на листьях опытных растений.

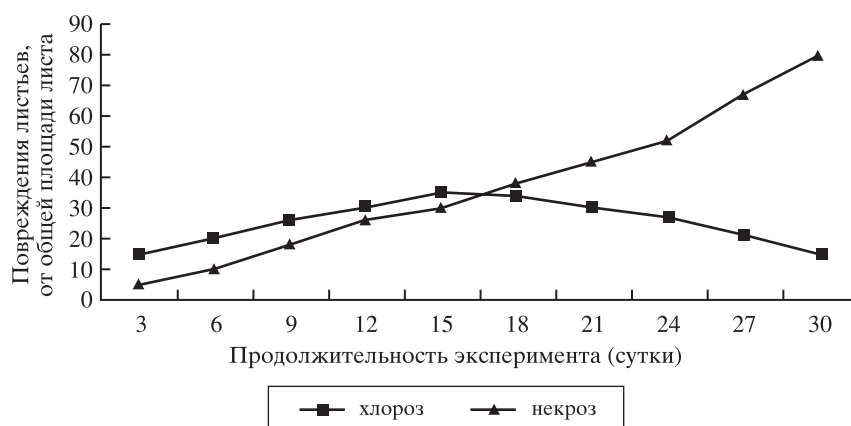


Рис. 24. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Ba^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

Анатомо-морфологические особенности растений при действии бария

Длина жилок изменяется в пределах от $0,98 \pm 0,04$ мм/мм² в верхней части листа до $0,91 \pm 0,01$ в средней его части, при этом среднее значение длины жилок листьев опытных растений тополя составляет $0,94 \pm 0,02$ мм/мм², что значительно выше контрольного показателя – $0,85 \pm 0,01$. Наряду с увеличением жилкования листьев опытных растений количество устьиц на единицу поверхности листа в эксперименте также выше, чем в контроле. Это увеличение составляет 19 шт/мм².

Исследования особенностей строения ассимиляционных органов тополей позволили констатировать факт достоверного, но незначительного увеличения общей толщины апикальной части листьев опытных растений по сравнению с контролем за счет увеличения толщины верхней кутикулы, верхнего и нижнего эпидермиса, а также столбчатой паренхимы. При этом следует отметить, что толщина отдельных слоев и общая толщина листьев тополей в срединной части достоверно не отличается, а в базальной – за счет столбчатой и губчатой паренхимы даже снижается по сравнению с контролем. Общая средняя суммарная толщина листьев опытных растений достоверно не отличается от контрольных значений.

Экофизиологические эффекты при действии бария на древесные растения

Ионы Ba^{2+} обуславливают снижение дыхания листьев тополя бальзамического до $149,7 \pm 9,4$ мкл O_2 /г сырой массы · ч, что составляет 23% от контрольного значения. Такие показатели были установлены при проведении вегетационных экспериментов в водной культуре. Результаты опытов, проведенных в условиях песчаной культуры, показаны на рис. 25.

Действие ионов Ba^{2+} на дыхание листьев тополя характеризуется следующим образом: на 6-е и 9-е сут. эксперимента происходит значительное снижение показателя дыхания листьев, на 12-е сут. между значениями дыхания листьев опытных и контрольных растений различий не обнаружено. На 15-е сут. отмечается резкое увеличение показателя дыхания листьев опытных растений, но затем происходит постепенное снижение этого значения до уровня контроля – 18-е и 21-е сут. На 24-е сут. отмечалось некоторое снижение показателя дыхания, но после 27-х сут. достоверных различий между значениями дыхания листьев контрольных и опытных растений не обнаружено.

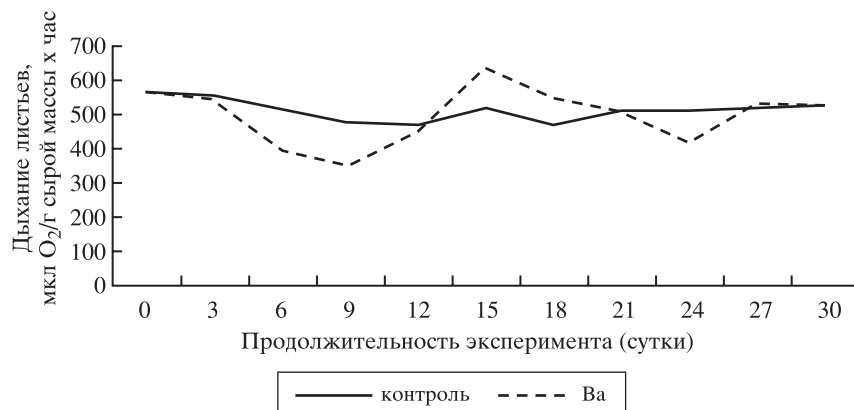


Рис. 25. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Ba^{2+} (песчаная культура)

В условиях хронического загрязнения окружающей среды отмечается трехкратное увеличение количества хлорофилла В в листьях опытных растений по сравнению с контролем. При этом наблюдается снижение количества хлорофилла А и каротиноидов в опыте – $0,1916 \pm 0,0193$ ($0,4726 \pm 0,0041$) и $0,0510 \pm 0,0032$ ($0,1726 \pm 0,0009$) мг/г сырой массы листа. Суммарное содержание пигментов в листьях опытных и контрольных растений тополя не отличается.

Изменения содержания пигментов фотосинтеза после залпового однократного загрязнения среды ионами Ba^{2+} показаны на рис. 26–29.

При действии ионов Ba^{2+} значение содержания хлорофилла А в листьях опытных растений снижается относительно контрольных показателей на третьи сутки эксперимента, затем происходит увеличение содержания хлорофилла А к концу эксперимента отмечается повышенное содержание хлорофилла А в листьях опытных растений относительно контрольных образцов.

Содержание хлорофилла В в листьях опытных растений повышается относительно контрольных показателей на третьи сутки эксперимента, затем происходит снижение содержания хлорофилла В – 6–21-е сут.; на 24-е и 27-е сут. достоверных различий в содержании пигмента не обнаружено. Но к концу эксперимента в листьях опытных растений по сравнению с контролем образцов отмечается повышенное содержание хлорофилла В.

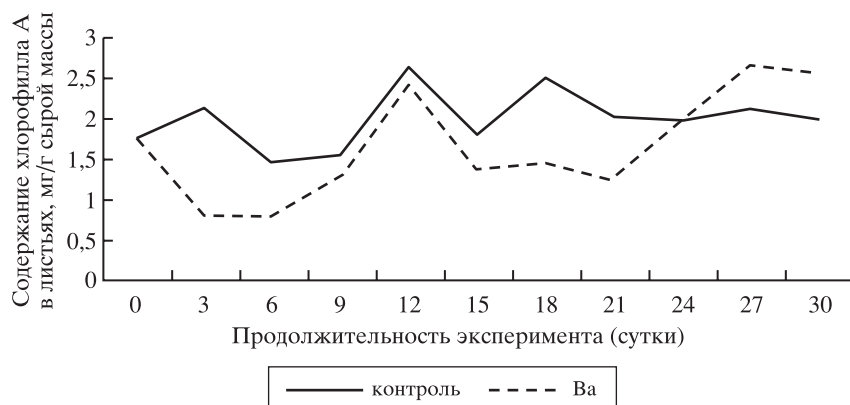


Рис. 26. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ba^{2+} (песчаная культура)

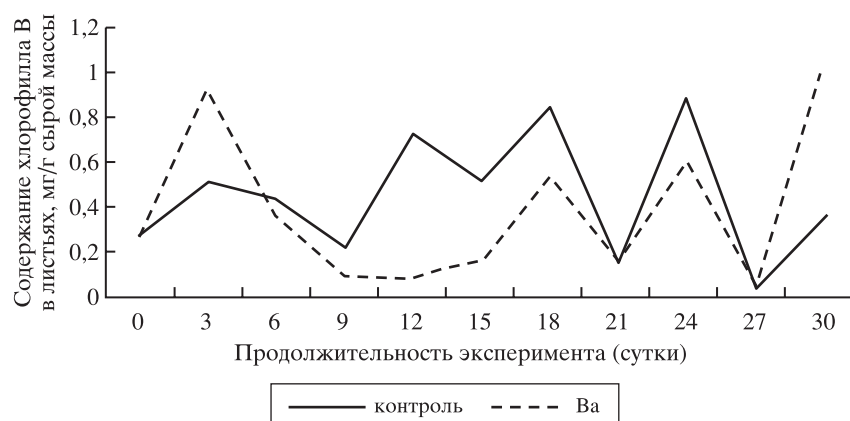


Рис. 27. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ba^{2+} (песчаная культура)

Под действием ионов Ba^{2+} содержание каротиноидов в листьях тополя изменяется на третьи сутки эксперимента – происходит снижение содержания пигментов в листьях опытных растений. Затем происходит постепенное увеличение содержания каротиноидов в листьях опытных растений – 6–12-е сут. В ходе дальнейших исследований установлено, что изменения содержания пигментов в листьях растений тополя, подверженных действию ионов Ba^{2+} характеризуются как незначительные по сравнению с

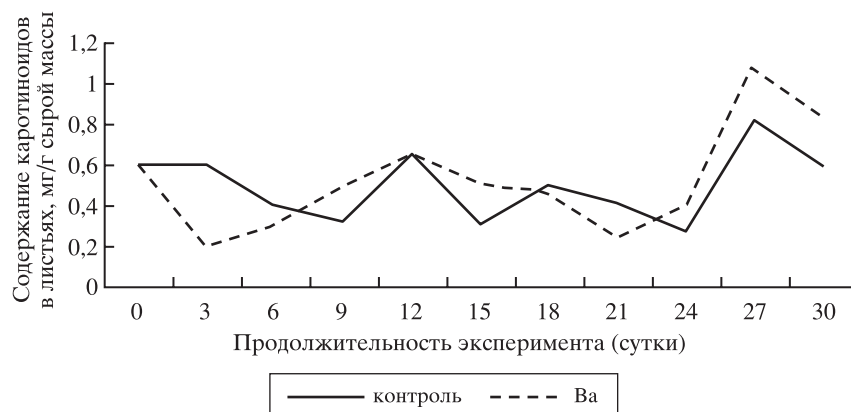


Рис. 28. Изменения содержания хкаротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ba²⁺ (песчаная культура)

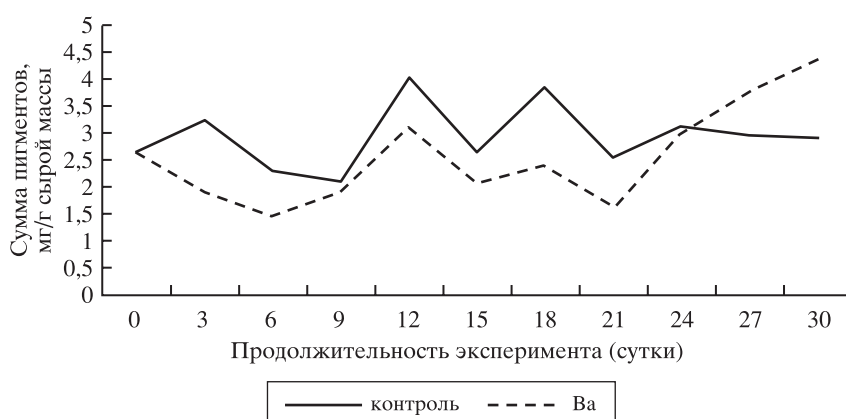


Рис. 29. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Ba²⁺ (песчаная культура)

контрольными значениями. К концу эксперимента содержание каротиноидов в листьях опытных растений было выше, чем в листьях контрольных растений.

При действии ионов Ba²⁺ на растения тополя суммарное содержание пигментов в листьях изменяется по сравнению с контролем следующим образом – уже на третьи сут. эксперимента наблюдается резкое снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях опытных растений, которое продолжается до 21-х сут. За-

тем происходит увеличение содержания пигментов в листьях опытных растений 24-е и 27-е сут. и к концу эксперимента количество пигментов фотосинтеза в листьях контрольных растений значительно ниже по сравнению с опытными образцами.

МАРГАНЕЦ

Характеристика элемента. Элемент VII группы периодической системы. Атомный номер 25. Тяжелый серебристо-белый металл. В природе элемент представлен одним стабильным изотопом – ^{55}Mn [Вредные..., 1988].

Содержание в природе. Среднее содержание Mn в земной коре 0,1%, в большинстве изверженных пород 0,06–0,2% по массе, где он находится в рассеянном состоянии в форме Mn^{2+} (аналог Fe^{2+}). На земной поверхности Mn^{2+} легко окисляется, здесь известны формы Mn^{3+} и Mn^{4+} . В биосфере Mn энергично мигрирует в восстановительных условиях и малоподвижен в окислительной среде. Наиболее подвижен Mn в кислых водах тундры и лесных ландшафтов, где он находится в форме Mn^{2+} . Содержание Mn здесь часто повышено и культурные растения местами страдают от избытка Mn; в почвах, болотах, озерах, болотах образуются железомарганцевые конкреции, озерные и болотные руды. В сухих степях и пустынях в условиях щелочной окислительной среды Mn малоподвижен, организмы бедны Mn, культурные растения часто нуждаются в марганцевых микроудобрениях. Речные воды бедны Mn (10^{-6} – 10^{-5} г/л), однако суммарный вынос этого элемента реками огромен, причем основная его масса осаждается в прибрежной зоне. Еще меньше Mn в воде озер, морей и океанов при этом во многих местах океанического дна распространены железомарганцевые конкреции [Виноградов, 1935; Ваденин, 1983; Вредные ..., 1988].

Роль марганца в жизни животных и человека

Марганец широко распространен в природе и является постоянной составной частью живых организмов. Его содержание в животных организмах составляет сотысячные – тысячные доли процента. Беспозвоночные более богаты марганцем по сравнению с позвоночными. Mn является активатором ряда ферментов, участвующих в процессах дыхания, биосинтезе нуклеиновых кислот, усиливает действие инсулина и других гормонов, влияет на кроветворение и минеральный обмен. Марганец обнаружен во всех органах и тканях человека – наибольшее его количество содержится в печени, скелете и щитовидной железе. Суточная потребность человека в Mn – 3–8 мг, но при физической нагрузке и

недостатке солнечного света потребность увеличивается. Дети нуждаются в марганце больше, чем взрослые. Установлено, что недостаток Mn отрицательно влияет на рост и развитие ребенка, вызывая анемию и нарушение минерального обмена костной ткани [Растения..., 1983; Вредные..., 1988].

Значение марганца в жизни растений

Биологическая роль марганца изучена достаточно хорошо. Он содержится в тканях всех растений, хотя количественные характеристики у разных систематических групп сильно различаются. Максимальное количество марганца содержится в цитоплазме растительных клеток, из органелл – в хлоропластах. Симптомами его недостаточности являются пятна вытянутой формы на листьях, которые проявляются чаще при выращивании растений на карбонатных и торфяных почвах [Прохорова и др., 1998].

Функции Mn в растительных клетках разнообразны. Основные из них: катализирующая и участие в окислительно-восстановительных реакциях и фотосинтезе. Установлено, что Mn входит в состав активных групп или кофакторов десяти ферментов и оказывает влияние на ауксиновый обмен. Mn повышает активность полифенолоксидазы, аскорбиноксидазы, пероксидазы. Отмечено участие Mn в реакциях дегидрогенизации и декарбоксилирования, в протекании цикла Кребса. Mn также необходим для синтеза нуклеиновых кислот. Есть указания на взаимосвязь Mn с некоторыми фенольными соединениями, на участие его в азотном обмене, в фотолизе воды. Mn влияет на избирательное поглощение ионов из окружающей среды. Он тормозит поглощение Ca и Mg. Отмечается антагонизм в накоплении Cu и Mn [Прохорова и др., 1998].

Считается, что Mn не является загрязняющим почвы элементом, но известно, что в кислой среде наблюдаются эффекты фитотоксичности Mn [Алексеев, 1987]. При избыточном увлажнении и плохой структурированности почвы возможны токсические эффекты Mn при нейтральной реакции среды. Ю.В. Алексеев [1987] указывает на фитотоксичность Mn^{+2} при его высоком содержании в почве и называет относительно толерантные к избытку Mn растения: овес (*Avena sativa* L.), рожь (*Secale cereale* L.), сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.), сельдерей (*Apium graveolens* L.), бобы (*Vicia eufaba* Mur.). Признаки токсичности Mn – некрозы на коре яблонь (*Malus sylvestris* Mill.), черная шероховатость стебля у картофеля (*Solanum tuberosum* L.), хрупкость черешков листьев [Алексеев, 1987].

Максимальное количество Mn накапливается в листьях черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.) (610,0 мг/кг), что превы-

шает фитотоксичную концентрацию для растений, равную 500,0 мг/кг. Довольно высокая концентрация Мп выявлена в листьях клена остролистного (*Acer platanoides* L.) (229,24 мг/кг) и бузины красной (*Sambucus sibirica* Nakai) (215,0 мг/кг). У большинства видов древесных растений концентрация Мп находится в пределах от 40,0 до 150,0 мг/кг. Минимальное содержание Мп характерно для листьев калины обыкновенной (*Viburnum opulus* L.) – 5,73 мг/кг. Практически для всех видов древесных и кустарниковых растений лесостепного и степного Поволжья, кроме черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.), концентрации Мп не выходят за пределы нормы для растений, составляющей 25–250 мг/кг или 17–334 мг/кг. ПДК Мп для растений не установлена [Матвеев и др., 1997].

Нормальным содержанием Мп для трав считается 100,0 мг/кг или в интервале от 20,0 до 300,0 мг/кг сухого вещества. ПДК Мп для трав не установлена. Критической считается концентрация 300,0 мг/кг, фитотоксичной – более 500,0 мг/кг [Матвеев и др., 1997].

Фитотоксичность марганца, находящегося в почве, сильно связана с ее рН и редокс-потенциалом. Так, в почвах с рН ниже 5,5 Мп находится в растворимой форме, а при рН 5,7 и 7,5 превращение Mn^{2+} в Mn^{4+} ограничивает его подвижность в связи с образованием нерастворимых форм. Поэтому в полевых условиях марганцевая фитотоксичность наблюдается только на сильно-кислых почвах и почвах переизвесткованных, со щелочной реакцией [Прохорова и др., 1998].

Относительно толерантными к марганцу культурами являются овес (*Avena sativa* L.), рожь (*Secale cereale* L.), сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.), сельдерей (*Apium graveolens* L.) и бобы (*Vicia eufaba* Mur.). Средней толерантностью характеризуются ячмень (*Hordeum vulgare* L.), картофель (*Solanum tuberosum* L.) и красный клевер (*Trifolium rubens* L.). Наиболее чувствительной к концентрации подвижного марганца в почве является капуста [Прохорова и др., 1998].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания марганца в окружающей среде

Ионы марганца, находящиеся в растительном субстрате в избытке, обуславливают замедление роста листьев (рис. 30) при этом одновременно стимулируют их распускание (на одни сутки раньше по сравнению с контролем). Количество черенков, у которых раскрываются все почки с образованием листьев и побегов при действии марганца составляет 85%.

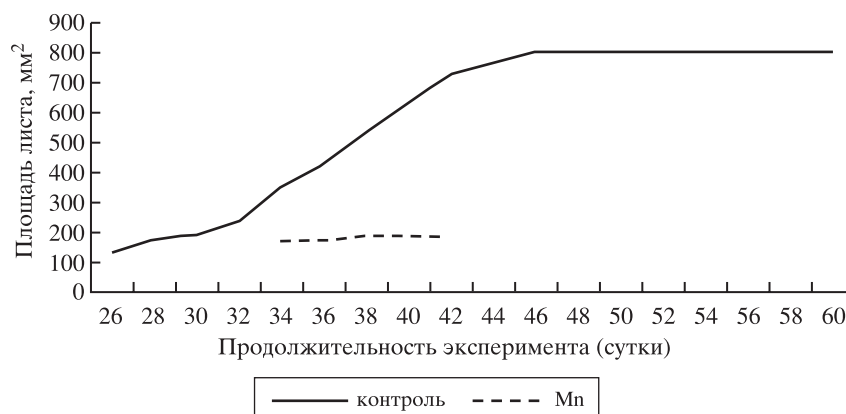


Рис. 30. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Mn (водная культура)

Образование первых корней у опытных растений при их выращивании в растворе соли марганца происходило на 29 сут. эксперимента (контроль – на 4 сут.). В песчаной культуре после однократной обработки количество корней первого порядка у черенков в среднем было 13 шт., что на четыре меньше контрольного значения; общая длина корней первого порядка в опыте на 25% меньше по сравнению с контролем, а общая масса корневых систем опытных и контрольных растений достоверно не отличается.

Аккумуляция марганца в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

Распределение марганца в органах растений происходит неравномерно. По ряду причин, среди которых следует выделить биологические особенности различных видов древесных растений, условия произрастания, токсичность растительного грунта и содержания в нем марганца отмечается довольно сильное варьирование содержания марганца в органах и тканях древесных растений (табл. 7).

Содержание марганца, как одного из наиболее важных физиологических элементов исчисляется сотнями ppm. Анализируя данные о количественном содержании марганца в различных органах березы бородавчатой отмечено значительное накопление этого элемента в листьях – до 424 ppm, при этом содержание марганца в корнях, коре и побегах не превышает 200 ppm. Максимальное накопление металла в листьях обуславливает повторную интоксикацию во время опадения листьев.

Таблица 7

Содержание марганца (ppm) в различных органах березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на отвалах буроугольного месторождения (Башкирское Предуралье)

Вид		Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Ассимиляционные органы	1-й год	424±67,3	–	348±51
	2-й год	–	–	749±96
	3-й год	–	–	759±83
Побеги	1-й год	192±19,5	858±109	154±6,1
	2-й год	151±16,9	1130±137	216±12,7
	3-й год	116±9,4	1140±119	242±15,0
Кора (на высоте 1,3м)		160±27,1	127±24,8	62±4,9
Корни (на глубине 0–20 см)		156±22,8	589±102	130±20,4
Грунт под насаждением		601±173,8	673±199,1	514±152,7
Грунт необлесенного участка		991±267,2		

Таблица 8

Содержание марганца (ppm) в почвогрунтах на отвалах полиметаллических месторождений

Название местоположения	Mn
Карьер Красовского хромитового месторождения	1410
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	4260
Контроль оз. Узункуль	1540

В двух и трех-летних побегах лиственницы Сукачева содержание этого элемента различается незначительно – около 1130 ppm, в однолетних побегах содержание марганца несколько меньше (858 ppm), в коре – 127 ppm и корневой системе – более 589 ppm. Таким образом установлено, что в подземной части растения накапливается лишь пятая часть марганца, поступающего в растение.

Содержание марганца в различных органах сосны колеблется в пределах от 62 (кора) до 759 ppm (трехлетняя хвоя). В корневой системе сосны обыкновенной накапливается лишь двадцатая часть марганца (не более 130 ppm). Установлено, что происходит

Таблица 9

Содержание марганца (ppm) в вегетативных органах древесных растений на отвалах полиметаллических месторождений

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Mn
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	157
	Внешний слой коры	34
	Внутренний слой коры	41
	Древесина	22
	Корень	159
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	177
	Внешний слой коры	182
	Внутренний слой коры	259
	Древесина	36
	Корень	43
Контроль оз. Узункуль	Листья	219
	Кора	161
	Древесина	19
	Корень	118
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	379
	Кора	1010
	Древесина	136
	Корень	1310
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	1050
	Внешний слой коры	291
	Внутренний слой коры	152
	Древесина	73
	Корень	216
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	1130
	Кора	609
	Древесина	726
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	195
	Кора	62
	Корень	75

постепенное увеличение количества металла по мере развития органов растений. Это утверждение справедливо как для ассимиляционного аппарата, так и для побегов сосны обыкновенной. Суммарное содержание марганца в органах древесных растений достаточно велико, однако нельзя утверждать, что именно этот металл является основным загрязнителем данного техногенного ландшафта.

В почвогрунтах под насаждениями древесных растений содержание марганца, на 30% ниже относительно необлесенных участков отвалов бурогоугольных месторождений.

В таблицах 8 и 9 показаны изменения содержания марганца в почвогрунтах и органах древесных растений, произрастающих на отвалах полиметаллических месторождений.

Установлено, что содержание Mn в почвогрунтах на отвалах хромитового месторождения меньше, а на отвалах марганцевого месторождения значительно больше относительно фонового уровня.

Растения березы бородавчатой аккумулируют наибольшее количество марганца, если они растут на отвалах марганцевого месторождения. Наибольшее содержание марганца приходится на многолетние части растений – корневую систему и кору, наименьшее – на древесину и листья. На отвалах золоторудного месторождения максимальное количество марганца напротив отмечается в листьях, а минимальное – в древесине и корневой системе. Распределение марганца у березы, растущей на контрольных участках, аналогично схеме распределения этого элемента у деревьев, произрастающих на отвалах золоторудного месторождения.

Следует отметить наибольшее содержание марганца в листьях и корневой системе берез, растущих в пределах карьера хромитового месторождения. При этом у берез, произрастающих на отвалах хромитового месторождения наибольшее количество марганца обнаруживается в коре.

Распределение марганца в растениях сосны обыкновенной на отвалах золоторудного месторождения выглядит следующим образом: хвоя > кора > корневая система.

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием марганца

В условиях хронического загрязнения окружающей среды марганцем на всех листьях тополя обнаруживаются различные повреждения. Помимо повреждений в виде хлорозов – 25% (межжилковые – 5%, по центральной жилке – 20%), некрозов – 25% (краевые – 5%, по центральной жилке – 20%), скручиваний – 50%,

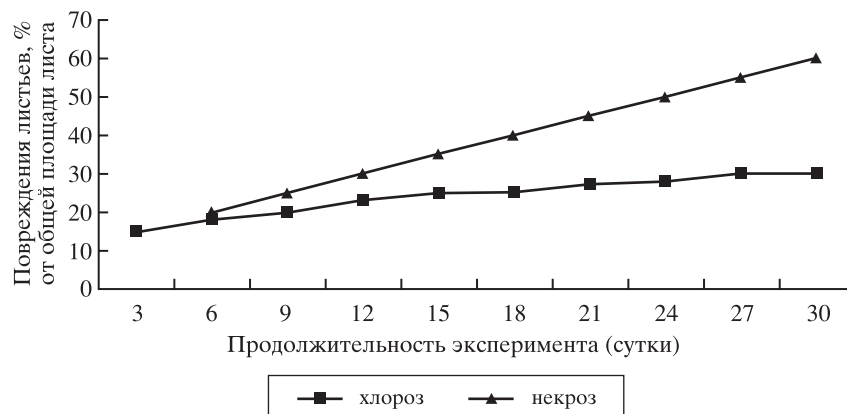


Рис. 31. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Mn^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

у некоторых растений на верхней стороне листьев отмечено появление белых волдырей.

Особенностью повреждения ассимиляционного аппарата тополя ионами марганца после однократной обработки растений является постоянное увеличение площади как некрозных, так и хлорозных пятен. Однако, в отличие от других металлов, марганец обуславливает появление некрозных участков на листьях в самом начале эксперимента и их площадь не уступает хлорозам (рис. 31).

Анатомо-морфологические особенности растений при действии марганца

Относительная длина жилок на листьях тополя значительно ниже по сравнению с контрольными показателями. Так, установлены следующие значения длины жилок: апикальная часть – $0,66 \pm 0,02$ мм/мм² ($0,82 \pm 0,01$), срединная часть – $0,65 \pm 0,01$ ($0,86 \pm 0,02$) и базальная часть листа – $0,60 \pm 0,02$ ($0,87 \pm 0,02$). Как следствие среднее арифметическое значение длины жилок на листьях опытных растений было ниже соответствующего контрольного значения – $0,63 \pm 0,01$ и $0,85 \pm 0,01$ мм/мм².

Следует отметить, что достоверных различий между количеством устьиц на листьях опытных и контрольных растений обнаружено не было.

При действии ионов марганца общая толщина листьев тополей снижается на 5–15% относительно контрольных значений.

При этом отмечается достоверное уменьшение толщины столбчатой и губчатой паренхимы в апикальной части листа, верхней кутикулы, верхнего и нижнего эпидермиса – в срединной части листа. Толщина остальных слоев, а также толщина листьев в базальной части в опыте и контроле достоверно не отличается.

Экофизиологические эффекты при действии марганца на древесные растения

Исследования показали, что после однократной обработки растений тополя раствором, содержащим сублетальные дозы ионов Mn^{2+} значительных изменений дыхания листьев не происходит. Однако следует отметить некоторое снижение уровня дыхания листьев опытных растений на 6–9-е и 24-е сут. эксперимента (рис. 32).

Дыхание листьев тополя при хроническом загрязнении в условиях вегетационного эксперимента в водной культуре составило лишь 30% от контрольного значения.

При действии ионов Mn^{2+} наблюдаются изменения содержания пигментов фотосинтеза – рис. 33–36.

При изучении характера действия Mn^{2+} на содержание хлорофилла А в листьях тополя, установлено, что начиная с трех сут. и до 15-х происходит постоянное снижение, затем резкое увеличение – 18–24-е сут. эксперимента. Нормализация показателя содержания хлорофилла А отмечается на 27-е сут. – достоверных различий между содержанием пигмента в листьях контрольных и опытных растений не обнаружено.

Под действием ионов Mn^{2+} содержание хлорофилла В в листьях тополя изменяется на третьи сут. эксперимента – происходит резкое увеличение содержания пигмента в листьях опытных растений по сравнению с контролем. Затем наблюдалось постепенное снижение пигмента до уровня контроля – 6–9-е сут. На 12–18-е сут. эксперимента содержание хлорофилла В в листьях опытных растений было значительно ниже уровня исследуемого пигмента в листьях контрольных растений. Установлено, что на 21-е и 27-е сут. содержание хлорофилла В в листьях опытных растений нормализовалось. Однако на 30-е сут. эксперимента содержание пигмента в листьях опытных растений было гораздо ниже по сравнению с контрольным значением.

При действии Mn^{2+} на растения тополя содержание каротиноидов в листьях изменяется по сравнению с контролем следующим образом – уже на третьи сут. эксперимента наблюдается резкое снижение содержания пигмента в листьях опытных растений. По ходу эксперимента отмечаются скачкообразные изменения со-

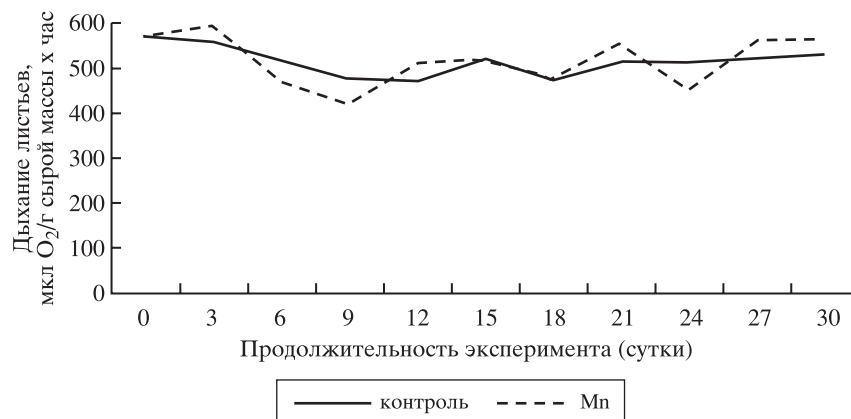


Рис. 32. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Mn^{2+} (песчаная культура)

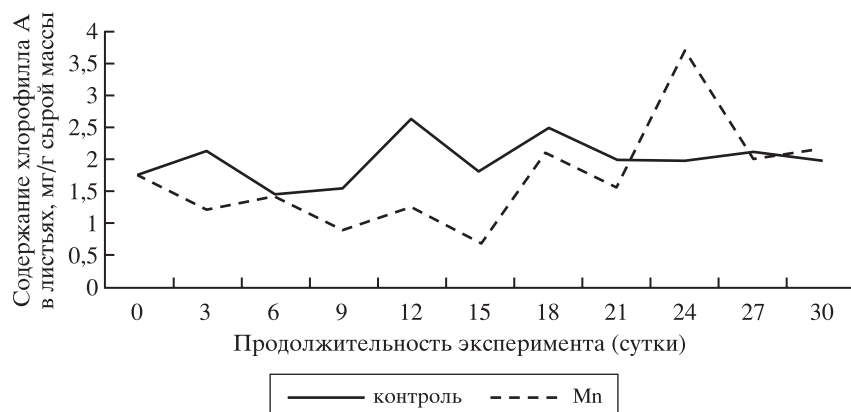


Рис. 33. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mn^{2+} (песчаная культура)

держания каротиноидов в листьях опытных растений. Следует отметить, что к концу эксперимента количество каротиноидов в листьях опытных растений несколько выше по сравнению с контрольным значением.

Под действием ионов Mn^{2+} содержание суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях тополя изменяется на третьи сут. эксперимента — отмечается снижение содержания пигментов в листьях опытных растений, затем происходило увеличение содержания

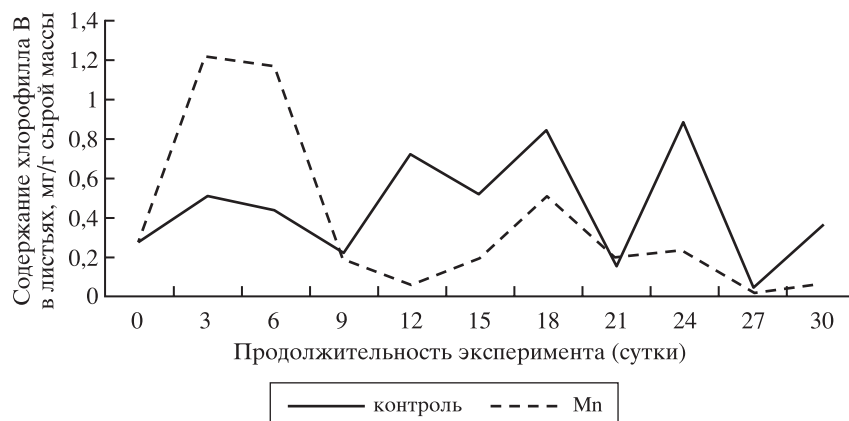


Рис. 34. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mn^{2+} (песчаная культура)

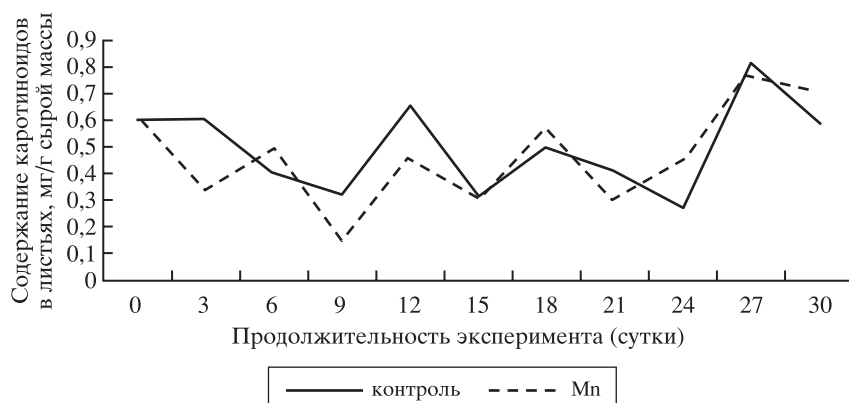


Рис. 35. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mn^{2+} (песчаная культура)

пигментов в опытных образцах – 6-е сут. эксперимента. В период с 9-х до 21-х сут. эксперимента содержание суммы пигментов в листьях опытных растений значительно ниже по сравнению с контрольным значением. На 24-е сут. суммарное содержание пигментов в опытных образцах было выше, чем в контрольных. Однако к концу эксперимента достоверных различий между количеством пигментов в листьях опытных и контрольных не обнаружено.

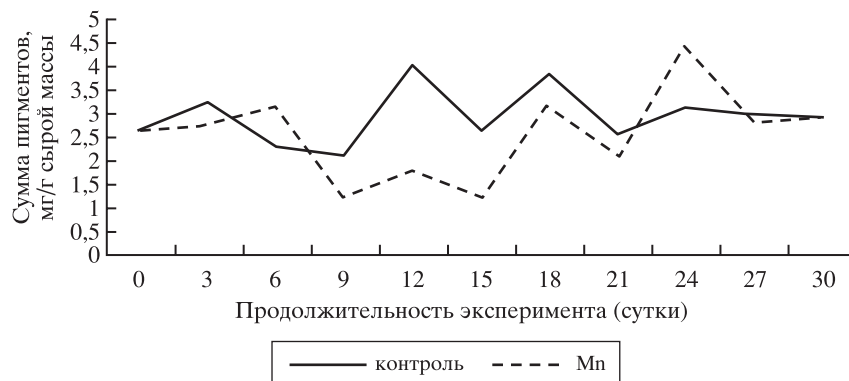


Рис. 36. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mn^{2+} (песчаная культура)

В водной культуре, при произрастании растений в условиях избыточного содержания ионов Mn^{2+} в субстрате отмечается 20%-е снижение суммы пигментов. Это снижение обусловлено двукратным снижением количества хлорофилла А и каротиноидов в листьях опытных растений тополя.

МАГНИЙ

Характеристика элемента. Элемент II группы периодической системы. Атомный номер 12. Природные изотопы: ^{24}Mg (78,6%), ^{25}Mg (10,11%), ^{26}Mg (11,29%). Металл. Парамагнитен, обладает сравнительно высокой мягкостью и пластичностью. Механические свойства Mg сильно зависят от обработки [Вредные..., 1988].

Содержание в природе. Mg входит в состав более 100 минералов, в том числе брусита $Mg(OH)_2$ с содержанием Mg 47,1%; магнезита $MgCO_3$ (28,8%); доломита $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ (18,2%) и др. Кларк Mg в земной коре 1,87%. Mg слабо задерживается в биологическом круговороте на континентах и с речным стоком поступает в океан. В морской воде содержится 0,13% Mg – меньше чем Na, но больше всех других металлов. Биомасса содержит 40 млрд т Mg. Морские водоросли содержат 520 мг% Mg в сухом веществе, наземные растения 320, морские животные 500, наземные животные 100, бактерии 700. Если судить по изменению содержания магния в бактериях (0,525% на сухое вещество), покрытосемянных растениях (0,305%) и млекопитающих (0,1%), то можно утверждать, что в ходе эволюции содержание Mg в живом организме снижалось [Вредные ..., 1988].

Роль магния в жизни животных и человека

Магний является постоянной составной частью животных организмов и человека (в тысячных – сотых долях процента). Концентрируют магний некоторые фораминиферы (до 3,5%) и известковые губки (до 4%). Животные и человек получают Mg в основном с пищей. Суточная потребность организма человека в магнии – 0,3–0,5 г; в детском возрасте, а также в период беременности и лактации эта потребность возрастает. Нормальное содержание магния в крови колеблется в пределах 4–4,3 мг%; при повышенном содержании наблюдается сонливость, потеря чувствительности, иногда паралич скелетных мышц. В организме магний накапливается в печени, затем значительное его количество переходит в кости и мышцы. В мышцах магний участвует в процессах активации анаэробного обмена углеводов. Антагонистом магния в организме является кальций. Нарушение магниево-кальциевого равновесия наблюдается при рахите, когда магний из крови переходит в кости, вытесняя из них кальций. При недостатке магния отмечается нарушение нормальной возбудимости нервной системы, сокращения мышц. Обмен магния в организме находится под контролем гормонов паращитовидных желез, понижающих содержание Mg в крови и пролактин, повышающим содержание магния [Вредные..., 1988].

Значение магния в жизни растений

Известно, что магний входит в состав пигментов растений, обеспечивая работу фотосинтетического аппарата. При этом отмечается, что для большинства сельскохозяйственных культур содержание Mg свыше 2,5% является избыточным [Ковальский, 1974]. Влияние избытка магния в почве идентично характеру избытка Ca – проявляется физиологическая сухость, на засоленных участках нарушается микотрофное питание, снижается доступ кислорода к поверхности всасывающих корней, происходит “известкование” чехлика и связывается фосфор. Вследствие сухости почвы и дефицита фосфора наблюдается суховершинность и преждевременный выпад древесных растений. [Власюк и др., 1974; Алексеева-Попова, 1990].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания магния в окружающей среде

Магний, являясь одним из важнейших элементов в жизни растения, при резком увеличении в окружающей среде оказывает

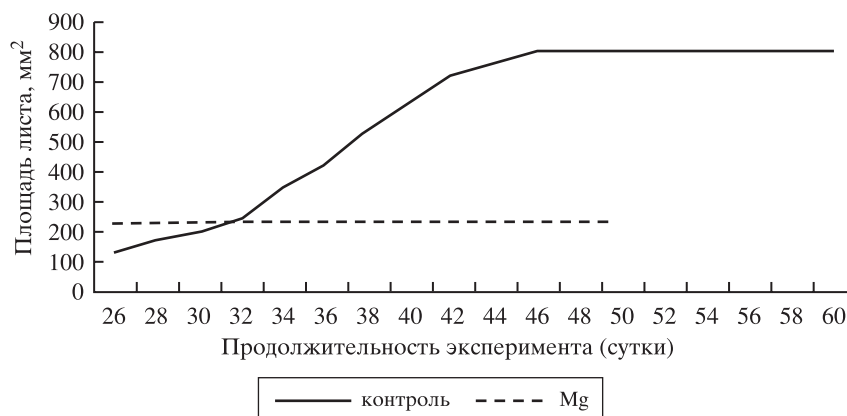


Рис. 37. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Mg^{2+} (песчаная культура)

негативное влияние на развитие растительных организмов. Отрицательное влияние проявляется в форме задержки роста листьев исследуемых растений – средняя площадь опытных растений не превышает 30% контрольного значения, кроме того, отмечается уменьшение продолжительности роста листьев (рис. 37).

Установлено, что магний оказывает стимулирующее воздействие на распускание листьев тополя (опыт – 5 сут., контроль – 6 сут.) при 95% уровне распустившихся листьев экспериментальных растений. Также отмечается 40% увеличение массы корневой системы опытных образцов при однократной обработке растений водными растворами ацетата магния. Достоверных различий между данными общей длины и количества корней первого порядка опытных и контрольных растений тополя не установлено.

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием магния

Результатом однократного действия ионов магния на растения тополя стало появление некротических пятен на листьях в первые сутки после обработки. Следует отметить, что площадь некротических пятен увеличивалась до конца эксперимента, при этом хлоротические пятна, образующиеся на листьях, занимали небольшие площади и отмечались лишь в единичных случаях (рис. 38).

Листья тополя бальзамического, сформировавшиеся на фоне избыточного содержания Mg^{2+} в растительном субстрате в значительной степени поражены – у 70% всех листьев отмечались ви-

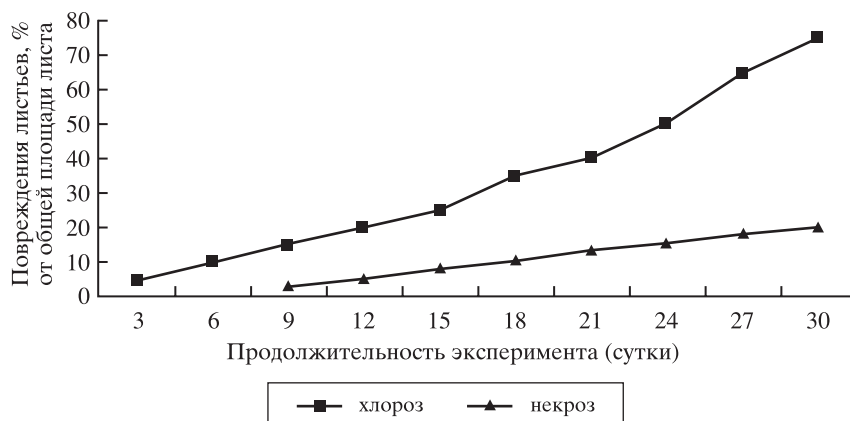


Рис. 38. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Mg^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

димые повреждения, из которых хлорозы составляют до 50% общей площади листа (краевые – 5%, по центральной жилке – 45%), некрозы – 16% (краевые – единичные (1%), по центральной жилке – 15%), усыхание – до 10% .

Анатомо-морфологические особенности растений при действии магния

Ионы магния обуславливают незначительное уменьшение относительной длины жилок у листьев тополя бальзамического. Так, длина жилок листьев экспериментальных растений изменяется в пределах $0,82 \pm 0,01$ в апикальной части до $0,79 \pm 0,01$ мм/мм² в базальной части. Следует, однако отметить, что у листьев контрольных растений жилкование у основания несколько больше, чем в апикальной части – $0,82 \pm 0,01$ и $0,87 \pm 0,02$ мм/мм². Среднее значение длины жилок на листьях тополя в опыте меньше, чем в контроле на $0,05$ мм/мм². Установлено также, что относительное количество устьиц на листьях опытных растений на 20% меньше по сравнению с контролем.

При действии ионов магния на растения тополя происходит значительное увеличение толщины листьев – в среднем на 20%. Наибольшее увеличение отмечается в базальной части листа, наименьшее – в апикальной. Следует отметить, что увеличение общей толщины листьев происходит по большей части за счет столбчатой губчатой паренхимы, в меньшей степени – за счет эпидермиса и кутикулы.

Экофизиологические эффекты при действии магния на древесные растения

В ходе исследований действия Mg^{2+} на дыхание листьев тополя установлено, что на 3–9-е сут. дыхание листьев опытных растений понижается относительно контроля. Затем происходит небольшое увеличение значений дыхания листьев опытных растений, пик которого приходится на 15-е сут. эксперимента. Вслед за увеличением наблюдается понижение значений дыхания листьев опытных растений – 18-е, 21-е и 24-е сут. Следует отметить, что показатели дыхания листьев контрольных и опытных растений выравниваются на 27-е сутки эксперимента. Вышеописанные изменения представлены на рис. 39.

Дыхание листьев тополя при произрастании в водной культуре, с повышенным содержанием ионов Mg^{2+} значительно меньше, чем у растений тополя произрастающих в дистиллированной воде: $158,6 \pm 14,0$ и $649,7 \pm 22,5$ мкл O_2 /г сырой массы/ч, соответственно.

Содержание суммы пигментов фотосинтеза в листьях опытных растений при произрастании в условиях хронического загрязнения среды ионами Mg^{2+} на 30% меньше по сравнению с контролем. При этом отмечается пятикратное снижение содержания каротиноидов и двукратное – хлорофилла А. Содержание хлорофилла В в листьях опытных растений несколько больше по сравнению с контролем – $0,3346 \pm 0,0112$ и $0,2879 \pm 0,0042$ мг/г сырой массы листа.

На рис. 40–43 отражены изменения содержания пигментов в листьях тополя после однократной обработки растений растворами с избыточным содержанием ионов Mg^{2+} .

Ионы Mg^{2+} оказывают крайне негативное влияние на содержание хлорофилла А в листьях – на протяжении большей части эксперимента содержание пигмента в листьях опытных растений было значительно ниже по сравнению с контрольными растениями.

При действии Mg^{2+} на растения тополя содержание хлорофилла А в листьях изменяется по сравнению с контролем следующим образом – на 3-и, 9-е и 15-е сут. эксперимента наблюдается резкое увеличение содержания пигмента в листьях опытных растений, на 6-е и 12-е сут. – снижение. На 18-е и 21-е сут. отмечается некоторое снижение уровня хлорофилла В в листьях опытных растений. Затем происходит постепенное увеличение содержания пигмента в опытных образцах и к концу эксперимента количество хлорофилла В в листьях опытных растений выше по сравнению с контролем.

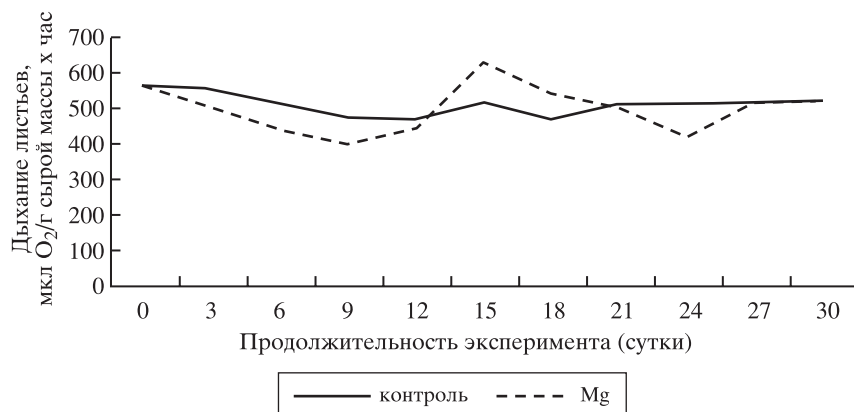


Рис. 39. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Mg^{2+} (песчаная культура)

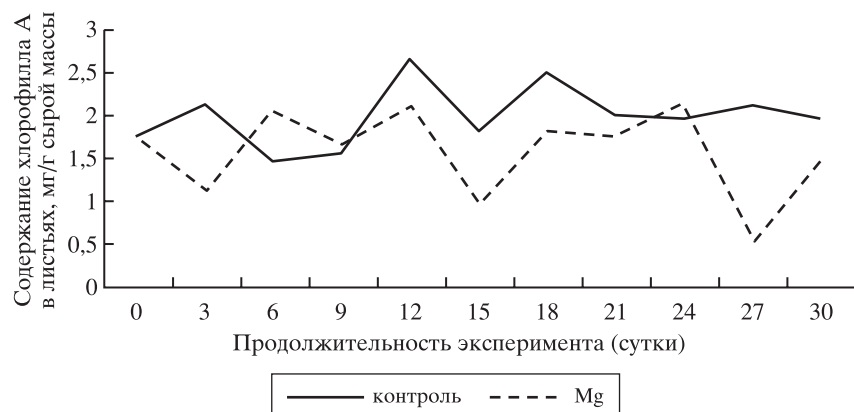


Рис. 40. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mg^{2+} (песчаная культура)

Содержание каротиноидов при действии Mg^{2+} в листьях опытных растений снижается относительно контрольных показателей на третьи сутки эксперимента. Затем происходит увеличение содержания каротиноидов в листьях опытных растений — 6-е и 9-е сут. эксперимента. На 12-е и 15-е сут. достоверных различий между содержанием каротиноидов в опытных и контрольных образцах не установлено. В последующем отмечаются изменения в содержании каротиноидов в листьях опытных расте-

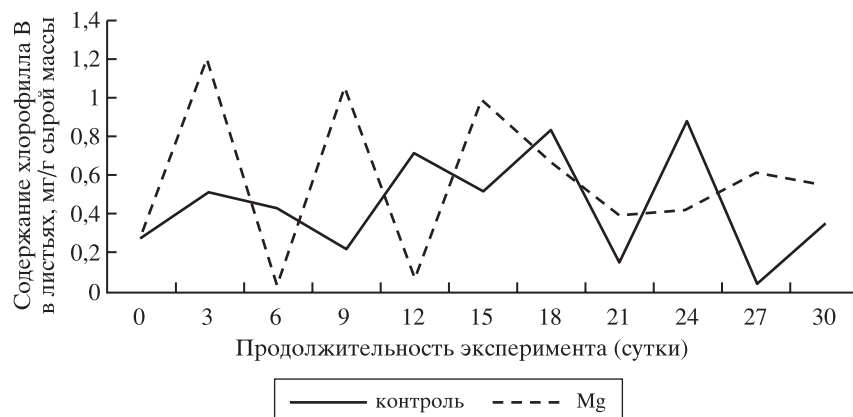


Рис. 41. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mg^{2+} (песчаная культура)

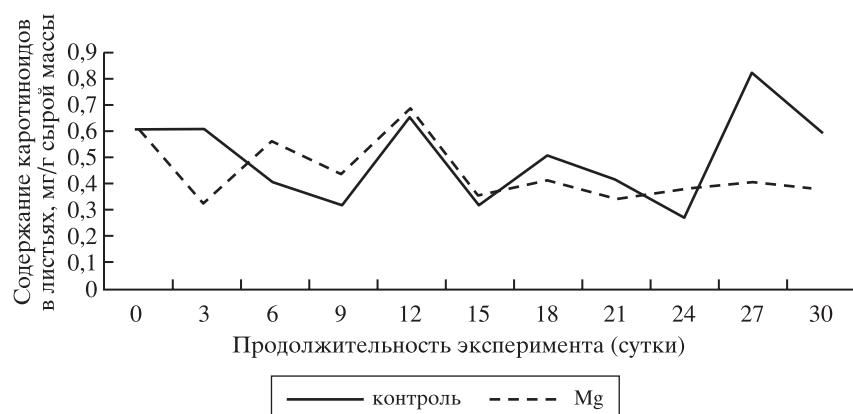


Рис. 42. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mg^{2+} (песчаная культура)

ний по сравнению с контролем и к концу эксперимента количество каротиноидов в листьях опытных растений было значительно ниже относительно контрольных образцов.

Содержание пигментов фотосинтеза в листьях тополя изменяется уже на третьи сутки эксперимента после обработки растений ацетатом Mg^{2+} (сублетальная концентрация). На 6-е и 9-е сут. суммарное количество хлорофиллов и каротиноидов в

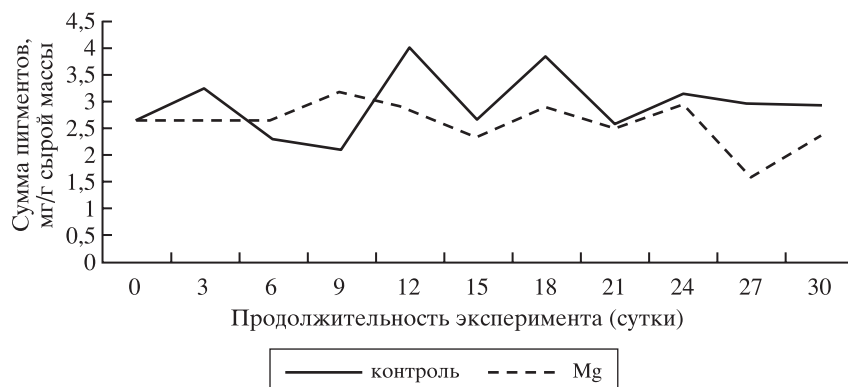


Рис. 43. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Mg^{2+} (песчаная культура)

листьях опытных растений было выше по сравнению с контролем. Затем наблюдается снижение содержания пигментов в листьях опытных растений до конца эксперимента по сравнению с контролем.

МЕДЬ

Характеристика элемента. Элемент I группы периодической системы. Атомный номер 29. Природные изотопы: ^{63}Cu (69,1%) и ^{65}Cu (30,9%). Металл, обладает высокими теплопроводностью и электропроводностью, легко поддается ковке [Алексеев, 1987; Вредные..., 1988].

Содержание в природе. Среднее содержание Cu в земной коре составляет $4,7 \cdot 10^{-3}\%$, общие мировые запасы Cu в рудах оцениваются в 465 млн т. Среди минералов Cu преобладают сульфиды, сульфаты, фосфаты, хлориды, встречается самородная медь, карбонаты и оксиды. Cu встречается также в вулканических и осадочных породах Вредные ..., 1988].

Общее количество Cu в океанах достигает $5 \cdot 10^9$ т. Миграция из рек в океаны составляет до $3 \cdot 10^5$ т в год, за это время в океанах осаждается около 410^4 т. Средние концентрации Cu в воде рек и озер 7 мкг/л, в океанах – 0,9 мкг/л Вредные..., 1988].

Содержание Cu в почвах составляет в среднем 15–20 мг/кг. Почвенные растворы содержат Cu в концентрации 0,001–0,06 мг/л. Более 90% этой меди комплексируется с органическими веществами. Миграционная способность меди существенно изменяется в зависимости от кислотно-щелочной реакции

среды. Низкие концентрации водородных ионов в сочетании с интенсивным дренированием уменьшают содержание меди в почве, а транспирация влаги растительностью вызывает концентрирование меди в почвенных растворах [Большаков, 1978; Bergquist, Sundbom, 1978].

Участвуя в атмосферной миграции, Cu находится в воздухе в виде аэрозольных твердых частиц размерами 0,25–25 мкм; концентрации Cu составляют, в среднем, 10–100 мг/м³. Над Южным полюсом содержание Cu в атмосфере равно 36±19 пк/м³ [Вредные..., 1988].

Роль меди в жизни животных и человека

Медь является необходимым микроэлементом для животных. Основная биохимическая функция меди – участие в ферментативных реакциях в качестве активатора или составе медьсодержащих ферментов. Среди животных наиболее богаты медью некоторые беспозвоночные (у моллюсков и ракообразных в гемоцианине содержание меди 0,15–0,26%). Поступая с пищей, медь всасывается в кишечнике, связывается с белком сыворотки крови – альбумином, затем поглощается печенью, откуда в составе белка церулоплазмينا возвращается в кровь и доставляется к органам и тканям [Вредные..., 1988].

Биоиндикаторами загрязнения среды соединениями Cu могут служить птицы: в перьевом покрове содержится значительное количество Cu – от 3,6 мг/кг сухого вещества – у сойки, до 14 мг/кг – у рябчика. Хорошо концентрируют Cu и, следовательно, могут служить индикаторами степени загрязнения сине-зеленые водоросли и моллюски; последние при содержании Cu в воде $3,5 \cdot 10^{-4}$ мг/л концентрируют ее до 6,8 мг/кг сухой массы. Другим биоиндикатором являются многощетинковые черви – полихеты. ЛК₅₀ для них 0,2–0,25 мг/л в течение 28 дней [Reich D. et al, 1976]. Наиболее подходящим объектом биотестирования считают солоноватых инфузорий, ЛК₅₀ для которых составляет 0,45±0,07 мг/л [Гроздов, Соколова, 1984].

Содержание Cu в организме человека колеблется (на 100 г сухой массы) от 5 мг в печени до 0,7 мг в костях, в жидкостях тела – от 100 мкг (на 100 мл) в крови до 10 мкг в спинномозговой жидкости. Всего в организме взрослого человека содержится около 100 мг меди. Медь входит в состав ряда ферментов (например, тирозиназы, цитохромоксидазы и др.), стимулирует кроветворную функцию костного мозга. Малые дозы меди влияют на обмен углеводов (снижение содержания сахара в крови), минеральных веществ (уменьшение в крови количества фосфора). Увеличение

содержания меди в крови приводит к превращению минеральных соединений железа в органические, стимулирует использование накопленного в печени железа при синтезе гемоглобина. При недостатке меди у животных уменьшается всасывание и использование железа, что приводит к анемии, сопровождающейся диареей и истощением. В больших дозах медь вызывает анемию, заболевания печени, болезнь Вильсона, рвоту и общее отравление [Вредные..., 1988].

Значение меди в жизни растений

Суммарное содержание Cu в фитомассе континентов составляет 25 млн т, массовая доля Cu в растениях равна $2 \cdot 10^{-4}\%$. Cu является одним из биокатализаторов, необходимых для жизни растений. Содержание Cu в воздушно-водных, плавающих и погруженных пресноводных растениях колеблется в пределах 8,4–24 мг/кг сухого вещества, в наземных растениях эта величина составляет 14 мг/кг. Из лесных пород – сосна, дуб, ель, рябина обыкновенная, береза содержат Cu в количестве 1–12, травостой, мхи и лишайники – в среднем, 5–9 мг/кг сухого вещества. Всего в массе живого вещества Земли содержится 200 млн т Cu [Ковальский, 1974; Алексеева-Попова, Ильинская, 1983].

Cu является одним из важнейших микроэлементов для развития растений. Она входит в состав пластоцианина, осуществляющего перенос электронов между фотосистемой II и фотосистемой I, входит в состав медьсодержащих белков и ферментов, которые катализируют окисление аскорбиновой кислоты, дифенолов и гидроксилирование монофенолов – аскорбатоксидазы, полифенолоксидазы, тирозиназы и ортодифенолоксидазы. Медь функционирует в цитохромоксидазном комплексе дыхательной цепи митохондрий, влияет на синтез леглобина и активного ряда ферментов, которые участвуют в фиксации молекулярного азота атмосферы. Она повышает засухо-, морозо- и жароустойчивость растений [Протасова и др., 1992].

Содержание в почве Cu на уровне 6–15 мг/кг считается недостаточным, 15–60 мг/кг – нормальным и более 60 мг/кг – избыточным. Избыток Cu в почве ведет к развитию хлороза у растений. Пороговые концентрации для сельскохозяйственных культур (в мг/кг сухой массы): для злаковых – 10, бобовых – 32. Токсичность для сельскохозяйственных культур проявляется при следующих концентрациях Cu в воде для поливки (мг/л): 0,1 для рассады апельсинов, и мандаринов; 0,17–0,20 для сахарной свеклы, томатов, ячменя; 0,5 для льна [Вредные..., 1988].

Cu относят к истинным биоэлементам, так как она всегда присутствует в почвах, растениях, тканях животных и участвует в разнообразных метаболических реакциях [Протасова и др., 1992]. Известны симптомы недостаточности Cu для растений: задержка роста, хлорозы листьев, потеря тургора, уменьшение урожая [Алексеев, 1987]. Считается, что из почвы в растения медь переходит слабо, фитотоксичные концентрации находятся в пределах концентраций от 10 до 20 мг/кг сухого вещества. Активно поглощают медь картофель, морковь, гречиха. Cu влияет на проницаемость сосудов ксилемы для воды и на устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды [Алексеев, 1987].

Фитотоксичность Cu выше, чем Zn. Особенно ярко она проявляется на легких почвах. Установлен антагонизм в накоплении Cu и Mn и независимость в накоплении Cu и Zn в надземной фитомассе и корнях [Матвеев и др., 1997].

Нормальное содержание Cu для трав считают интервал концентраций от 5,0 до 30,0 мг/кг. Критической концентрацией Cu для растений считают 150,0 мг/кг [Прохорова и др., 1998].

Медь, которая для растений является существенно важным элементом, в высоких концентрациях может оказывать токсическое действие, которое вдвое выше, чем у цинка. Симптомы избытка меди проявляются в виде хлороза и образования многочисленных окрашенных в коричневый цвет боковых корней. Признаки хлороза у растений появляются при содержании в почве 0,7–1,1 г/кг меди, экстрагируемой водой. Установлено существование двух видов реакций растений на избыток меди: латентное отравление, когда растение больше уже не может давать оптимальные приросты, а симптомы отравления почти не выявляются, и острое отравление, когда повреждения растений резко выражены. Увеличение ее содержания в почве в 12 раз приводит к ее накоплению в зерне, клубнях, соломе и листьях максимум в два раза. Так, для овса, к началу колошения токсично содержание меди 10–21 мг/кг, а для клевера красного в возрасте шесть недель – 18,2–19,6 мг/кг. Такие концентрации уже могут ухудшать качество растений, еще не отражаясь на урожайности.

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания меди в окружающей среде

Задержка распускания первых листьев на модельных растениях тополя бальзамического, при их выращивании в водных растворах солей меди, составляет восемь суток. Кроме того, не более чем у 40% экспериментальных растений раскрылись все почки на черенках. При этом в самом начале вегетации скорость

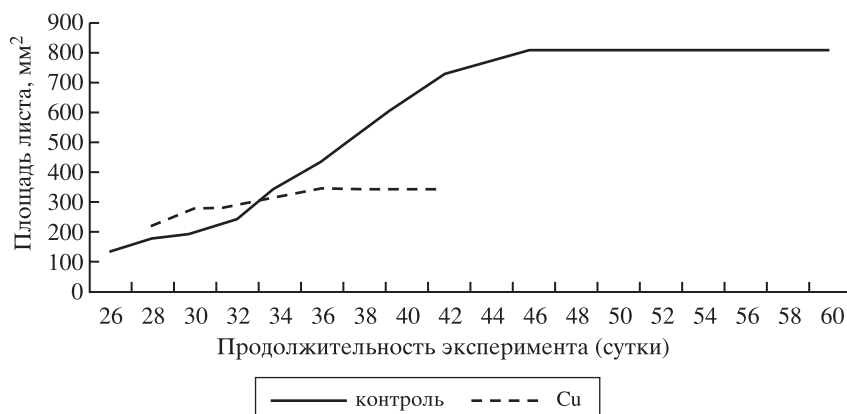


Рис. 44. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Cu^{2+} (водная культура)

роста листьев опытных растений была несколько выше по сравнению с ростом листьев в контроле. Однако уже на 34-е сут. эксперимента площадь листьев контрольных образцов была выше по сравнению с опытными и рост листьев опытных образцов прекратился на 40–42-е сут. Таким образом, продолжительность роста и средняя площадь листьев опытных растений гораздо ниже по сравнению с контрольными образцами (рис. 44).

Развитие корневых систем при хроническом загрязнении окружающей среды солями меди характеризуется как незначительное, так как появление первых корней отмечается у 90% растений только через 37–43 сут. после начала эксперимента. Следует отметить, что у черенков, помещенных в среду с избыточным содержанием $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ корневые системы не формировались у 10% растений. После однократной обработки растений солями меди отмечалось резкое уменьшение количества корней первого порядка – до 10 шт. на черенке (контроль – 17 шт.) и, как следствие, уменьшение общей длины корней первого порядка и общей массы корневой системы относительно контроля в 1,7 и 1,8 раза соответственно.

Аккумуляция меди в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

Показано, что суммарное содержание меди в надземной части березы бородавчатой более чем в пять раз превосходит содержание этого металла в подземной части растения. Таким образом, можно сделать заключение о том, что многолетние надзем-

Таблица 10

**Содержание меди (ppm) в различных органах растений березы
бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), произрастающих
на отвалах бурогоугольного месторождения (Башкирское Предуралье)**

Ассимиляцион ные органы	Побеги			Кора (на вы- соте 1,3 м)	Корни (на глу- бине 0–20 см)	Грунт под на- сажде- нием	Грунт необле- сенного участка
	1-й год	2-й год	3-й год				
следы	следы	37±1,2	149±7,1	32±2,9	44±3,0	следы	следы

ные органы березы бородавчатой выполняют депонирующую роль и способны к аккумуляции значительных количеств меди. Наибольшее количество меди содержится в трехлетних побегах (149 ppm), в то время как в листьях и в однолетних побегах медь не обнаружена (табл. 10).

В органах лиственницы Сукачева и сосны обыкновенной, произрастающих на отвалах бурогоугольной промышленности медь обнаруживается лишь в следовых количествах. В почвогрунтах под насаждениями сосны содержание меди незначительно, при этом в грунтах под лиственницей содержание меди колеблется в пределах 81±21,8 ppm.

В листьях березы бородавчатой, произрастающих на отвалах хромитового и золоторудного месторождений, отмечается максимальное накопление меди. У растений, произрастающих на отвалах марганцевого месторождения, в карьере хромитового месторождения и контроле наибольшее содержание меди отмечается в многолетних частях. Следует отметить, что кора и корневая система являются местами наибольшего скопления меди в березе. В коре и хвое сосны обыкновенной, произрастающих на отвалах марганцевого и золоторудного месторождения также происходит наибольшая аккумуляция меди (табл. 11).

Фоновое содержание меди в грунтах колеблется в пределах 77 ppm. Установлено, что содержание этого металла в грунтах карьера хромитового месторождения и отвальных грунтах марганцевого месторождения составляет 55 и 166 ppm соответственно, что значительно отличается от фонового значения.

Также были проведены комплексные исследования в зоне влияния крупного перерабатывающего предприятия – Башкирского медно-серного комбината (г. Сибай). Было установлено, что содержание меди в листьях (хвое) на пробных площадках варьирует от 0,57 ppm сухого вещества у тополя на обыкновенном и южном черноземах, до 12,6 ppm у сосны на выщелоченном чер-

Таблица 11

**Содержание меди (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Cu
Betula pendula Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	5,1
	Внешний слой коры	10
	Внутренний слой коры	5,3
	Древесина	4,2
	Корень	11
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	58
	Внешний слой коры	44
	Внутренний слой коры	20
	Древесина	30
	Корень	30
Контроль оз. Узункуль	Листья	7,9
	Кора	7,6
	Древесина	3
	Корень	10
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	5,9
	Кора	14
	Древесина	8,1
	Корень	19
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	57
	Внешний слой коры	47
	Внутренний слой коры	28
	Древесина	27
	Корень	33
Pinus sylvestris L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	9,3
	Кора	12
	Древесина	7,1
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	26
	Кора	31
	Корень	10

Таблица 12

**Содержание меди (ppm) в почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Cu
Карьер Красовского хромитового месторождения	57
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	166
Контроль оз. Узункуль	77

ноземе, в ветвях – от 3,9 ppm у березы на черноземе южном, до 13 ppm у тополя на черноземе обыкновенном, в корнях – от 3,04 ppm для сосны на черноземе выщелоченном, до 18,7 ppm для тополя на черноземе обыкновенном. Наиболее часто встречаются величины 8–11 ppm на выщелоченном, 6–9 ppm на обыкновенном и 5–7 ppm на южном подтипах черноземов. При этом у сосны и березы наибольшие количества меди содержатся в листьях (хвое) и ветвях, в то время как в корнях обнаружена незначительная ее концентрация (рис. 45, 46). У тополя наибольшее содержание металла отмечено в корнях и ветвях, наименьшее – в листьях (рис. 47). Дисперсионный анализ показал, что у сосны разница между содержанием меди в корнях и хвое, корнях и ветвях является существенной (фактическая разность $d >$ критерия наименьшей существенной разности (HCP_{05})), но такая разность несущественна для содержания металла в хвое и ветвях ($d < HCP_{05}$). У березы наблюдается значимая разница между количеством металла в листьях и ветвях, листьях и корнях, однако для ветвей и корней такая разница незначима. У тополя разница между содержанием меди в листьях, ветвях и корнях несущественна.

В целом, на исследованных пробных площадках среднее значение содержания меди составляет по листьям (хвое) 7,56 мг/кг, ветвям – 6,96, корням – 5,63. Проведенный нами дисперсионный анализ показал, что у изученных пород наблюдается существенная разница между содержанием металла в листьях (хвое), ветвях, с одной стороны, и в корнях, с другой. Между ветвями и листьями (хвоей) такая разница незначима. Также установлено, что у изученных древесных пород различия в содержании меди несущественны. Результаты дисперсионного анализа показали наличие существенной разницы между количеством металла в листьях и корнях тополя и аналогичных органах сосны, березы. Различия в содержании меди в ветвях исследованных пород незначимы.

Судя по содержанию меди в древесных растениях, интенсивность техногенных нагрузок снижается по мере удаления от гор-

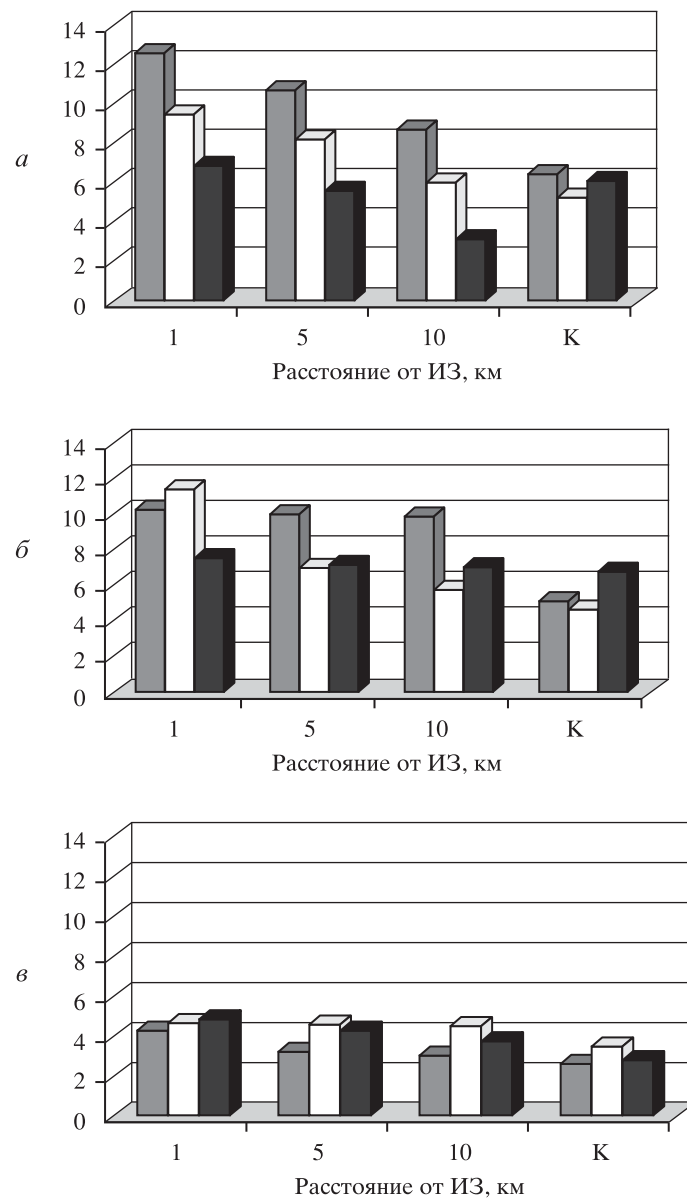


Рис. 45. Содержание меди (ppm) в сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на черноземах (ЧВ – выщелоченных ЧО – обыкновенный, ЧЮ – южных) Башкирского Зауралья. А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

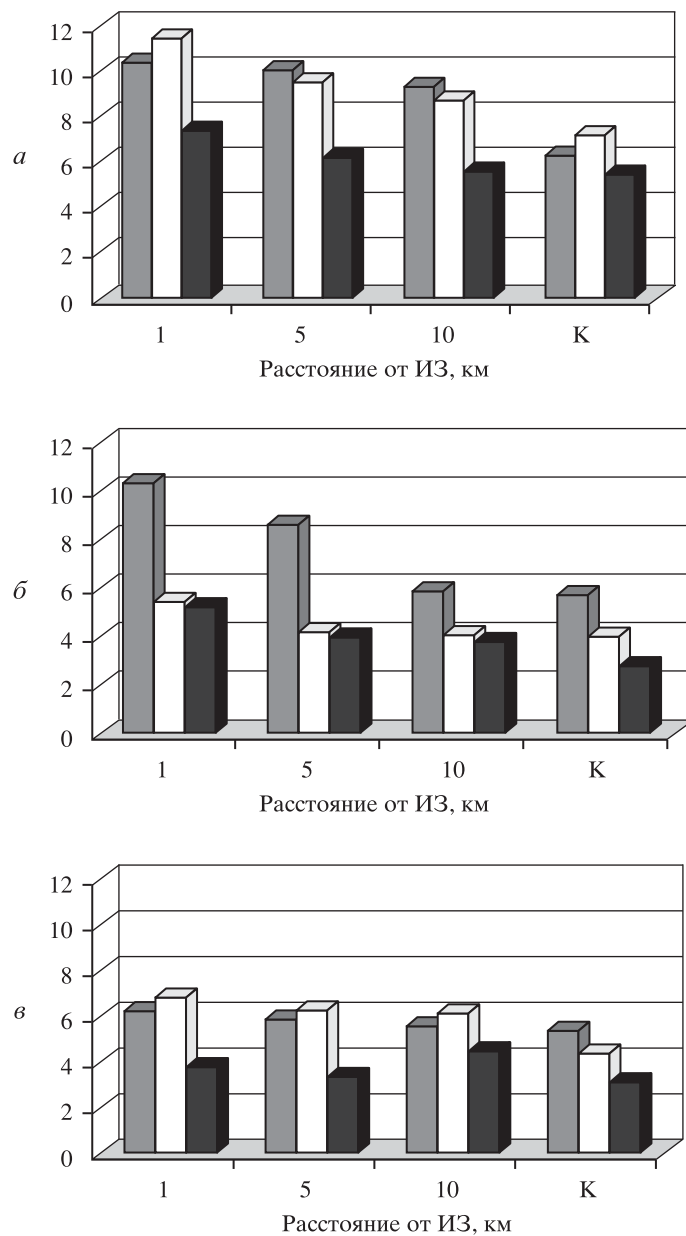


Рис. 46. Содержание меди (ppm) в березе бородавчатой (*Betula pendula* Roth.) на черноземах Башкирского Зауралья

А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

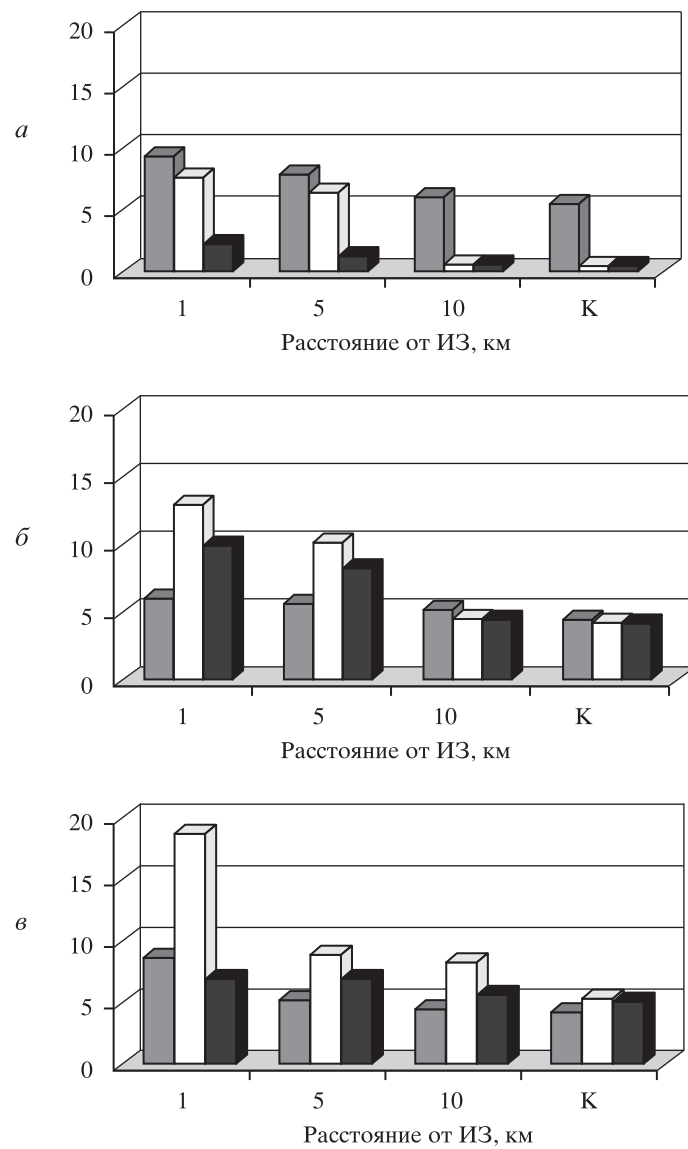


Рис. 47. Содержание меди (ppm) в тополе черном (*Populus nigra* L.) на черноземах Башкирского Зауралья
 А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

но-обогадительного комбината (ГОК), что видно на примере тополя (см. рис. 47).

По сравнению с условным контролем содержание меди достоверно увеличивалось во всех частях древесных пород. Больше всего меди аккумулировалось тополем на обыкновенном и южном черноземах в радиусе 5 км от ИЗ. Так, для листьев данного вида коэффициент аккумуляции составил на черноземе южном 3,1–5,5, на обыкновенном – 14,5–17,5. Ветви сосны также интенсивно накапливали металл: в непосредственной близости от ГОК на выщелоченном и обыкновенном черноземах K_a составил 2–2,4.

Исследования показали, что особенно активно медь накапливается тополями. Этот тезис подтверждает утверждение ряда авторов о том, что данный вид наиболее эффективно выполняет средоочищающие функции [Thomas, 1984; Дашкевич, 1982; Коваленко и др., 1983; Баталов и др., 1991; Гиниятуллин, 1996; Шихова, 1997; Кулагин и др., 2000]. Не подтвердилась отмеченная некоторыми исследователями [Cadiz, Los Santos, 1982; Шихова, 1997] особенность слабого поглощения ТМ хвойными породами. Содержание меди в хвое и ветвях сосны было выше средних (7–9 ppm) показателей.

По нашим данным, интенсивность загрязнения среды медью адекватно отражается аккумуляцией ее в листьях (хвое) и в меньшей степени проявляется накоплением в ветвях и корнях деревьев. Так, средняя величина K_a для листьев лежит в пределах от 4,7 до 14, для ветвей и корней – 4,5–5 и 4–5,1, соответственно. Это подтверждает мнение о том, что листья занимают ведущие позиции в поглощении поллютантов, поступающих с промышленными выбросами [Илькун, 1978; Кулагин и др., 2000; Kulagin, Batalov, 1989]. Аккумулирующая способность по отношению к меди у органов исследованных древесных видов снижается в ряду: листья (хвоя) > ветви > корни. Аналогичный ряд получен и по среднему значению содержания металла в органах древесных пород. Дисперсионный анализ показал наличие существенной разницы между содержанием меди в корнях и листьях (хвое), корнях и ветвях. Между ветвями и листьями (хвоей) такая разница незначима.

По интенсивности поглощения и количественному содержанию металла изученные древесные породы образуют ряд: тополь черный > сосна обыкновенная > береза бородавчатая.

Причем максимальные значения меди обнаружены на черноземе обыкновенном, затем следуют южный и выщелоченный подтипы. Данный факт объясняется повышенной техногенной нагрузкой Башкирского медно-серного комбината (БМСК) на

прилегающую территорию по сравнению с Бурибаевским рудоправлением и Учалинским горно-обогатительным комбинатом (УГОК), что связано как с большими объемами, так и со способами добычи медьсодержащих руд.

Следует отметить, что одним из основных компонентов разрабатываемых месторождений Башкирского Зауралья является медь. Интенсивная эксплуатация медноколчеданных месторождений оказывает серьезное влияние на содержании данного металла во всех биологических средах, в том числе и в почве. Исследования показали, что в значительной мере содержание меди зависит от удаленности территории от источника загрязнения и интенсивностью промышленного производства.

Такая зависимость аккумуляции в почве валовых и подвижных форм металла от объемов и способов добычи и переработки полезных ископаемых особенно ярко проявилась на черноземах обыкновенных в зоне воздействия БМСК. В непосредственной близости от ГОКа пахотный слой черноземов обыкновенных по содержанию валовой и подвижной меди имеет очень высокий (шестой) уровень загрязненности почвы относительно фона. При таком уровне, согласно И.Г. Важенину [1983], болеет и гибнет растительность, становится непригодной для употребления в пищу продукция растениеводства и животноводства, изменяется химический состав верхнего слоя почвы, резко ухудшаются ее агрохимические показатели.

На всех остальных пробных площадках, а также на участках с черноземами выщелоченными и южными, отмечаются слабый (первый) и умеренный (второй) уровни загрязненности по валовым и подвижным формам металла. При этом, по Важенину [1983], страдает вся почвенная биота, подавлены биохимические процессы (ферментативная активность, нитрификационная деятельность и др.).

Сопоставляя данные по содержанию валовых форм меди с местным геохимическим фоном, можно сделать вывод, что черноземы обыкновенные имеют категорию умеренного загрязнения [по Добровольскому, 1999], черноземы выщелоченные и южные содержат металл в пределах природной флюктуации. При оценке состояния загрязнения почвы активными формами меди выявлено, что черноземы выщелоченные находятся на уровне сильного загрязнения, черноземы обыкновенные и южные – очень сильного. Высокий уровень загрязнения подвижными формами металла вызывает опасения, так как именно в такой форме тяжелые металлы проникают в растения и поступают в пищевые цепи.

На расстоянии одного км от источника эмиссии в черноземах обыкновенных выявлено превышение ПДК по валовым формам

меди в 14,3 раза (четвертая степень химической деградации почв согласно “Система оценки...”, 1992), по подвижным формам – в 75,7 раза (пятая степень); на удалении 5 км, соответственно, в 2,3 (вторая степень) и 12,3 раза (четвертая степень).

На удалении пяти км от ИЗ в слое 0–40 см черноземов обыкновенных содержание валовых форм металла в 1,1–3 раза превосходит РГФ который составляет 49 мг/кг [Оценка экологического..., 2001]. Такая ситуация обусловлена повышенной техногенной нагрузкой БМСК на территорию по сравнению с Учалинским и Бурибаевским ГОКаи.

Концентрация валовых форм металла в черноземах выщелоченных и южных не превышает РГФ. Лишь на расстоянии 10 км в черноземе выщелоченном наблюдается превышение над РГФ во всех исследованных слоях почвы в 1,5 раза. Иная ситуация складывается при сопоставлении результатов с РГФ для подвижных форм меди, составляющим 1,5 мг/кг. На всех исследованных участках, включая и площадки условного контроля по подвижным формам, отмечается превышение над РГФ.

Проведенные исследования подтверждают наличие на территории БЗ природной геохимической аномалии по содержанию в почве меди [Ковальский, 1974; Скарлыгина-Уфимцева и др., 1976; Ковальский и др., 1981; Алексеева-Попова и др., 1983, 1991; Оценка экологического..., 2001], т.е. повышенная концентрация меди в черноземе выщелоченном на удалении 10 км от ИЗ объясняется естественной обогащенностью материнской породы данным металлом. Об этом свидетельствует и тот факт, что содержание металла на данной пробной площади возрастает с глубиной. На площадях условного контроля с черноземами выщелоченными и обыкновенными концентрация меди в пахотном горизонте составляет 1,6 ПДК и 1,5 ПДК по валовым формам и, соответственно, 6,6 ПДК и 5,7 ПДК по подвижным формам. На условном контроле в черноземе южном аналогичный горизонт содержит подвижные формы меди в размере 2 ПДК. Поэтому было бы ошибочным абсолютизировать принятые величины ПДК, так как они являются прежде всего лишь своеобразными опорными точками для сравнительных оценок.

На всех исследованных участках, за исключением условного контроля с черноземами южными и площадки в 10 км от ИЗ на том же подтипе черноземов, отмечено превышение содержания валовой меди над фоновым показателем для черноземов, составляющим 25 мг/кг [Яковлев и др., 1993]. Это подтверждает необходимость сопоставления концентрации загрязнителя с местным геохимическим фоном, который более информативен, чем показатели для большинства регионов.

Таким образом, на черноземе обыкновенном установлено загрязнение валовой медью по сравнению с местным контролем. На выщелоченном и южном подтипах черноземов содержание металла находится в пределах природных колебаний. По подвижным формам меди выявлено умеренное (черноземы выщелоченные) и очень сильное (черноземы обыкновенные и южные) загрязнение.

Такие же результаты по содержанию валовых форм меди получены при сопоставлении с региональным геохимическим фоном. В то же время по содержанию подвижных форм меди во всех исследованных черноземах отмечено превышение РГФ.

Высокая концентрация валовых и подвижных форм металла в черноземе обыкновенном является следствием повышенной техногенной нагрузки БМСК, находящегося в зоне распространения данного подтипа черноземов, по сравнению с УГОК и Бурibaевским РУ.

По суммарному накоплению меди зональные подтипы черноземов БЗ образуют следующий ряд: обыкновенные > выщелоченные > южные.

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием меди.

В вегетационных опытах установлено, что лишь 30% листьев тополя бальзамического, выращенных в водных растворах с повышенным содержанием ионов Cu^{2+} , не имели видимых повреж-

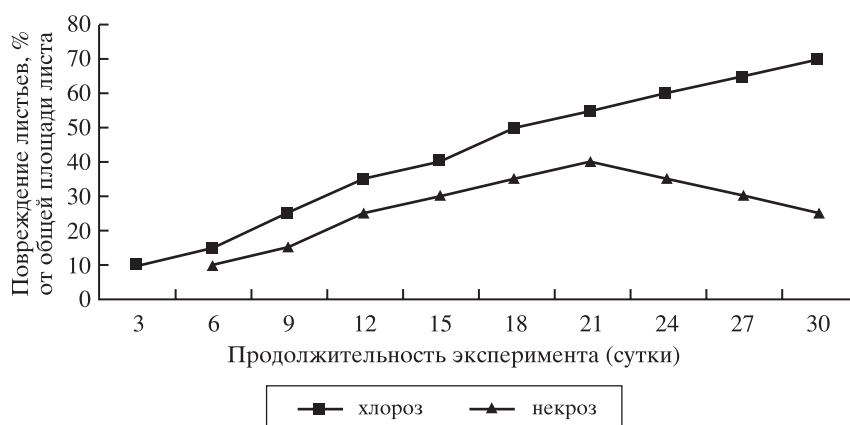


Рис. 48. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Cu^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

дений. Среди видимых повреждений наиболее частыми были хлорозы по центральной жилке (до 40% площади листьев), межжилковые некрозы – в среднем 10%. На некоторых листьях отмечалось появление белого налета, средняя площадь которого составляла 20%.

В песчаной культуре после однократной обработки растений растворами солей меди уже на третьи сутки отмечается появление некрозных пятен диффузного характера. Несколько позже фиксировали наличие хлорозных пятен на листьях. Однако по сравнению с некрозами хлорозы не получили сильного развития и их площадь не превышала 30% от общей площади листа. Между тем, в ходе эксперимента наблюдалось постоянное увеличение площади некрозов (рис. 48).

Анатомо-морфологические особенности растений при действии меди

Отмечается резкое снижение количества устьиц на листьях опытных растений тополей при действии на них избытка ионов меди. Установлено, что относительное количество устьиц после обработки растений не превышает 300 шт/мм², когда в контроле этот показатель составил 445 шт/мм².

Параллельно происходит увеличение относительной длины жилок на листьях экспериментальных растений до $0,89 \pm 0,03$ мм/мм²: с колебаниями от $0,93 \pm 0,05$ в базальной части до $0,87 \pm 0,02$ в срединной и апикальной частях листа. Среднее значение жилкования листьев в контроле составило $0,85 \pm 0,01$ мм/мм².

Ионы меди обуславливают 5%-ое увеличение средней суммарной толщины листьев опытных растений относительно контроля. Изменения толщины как в апикальной, так и в срединной и базальной частях происходит за счет увеличения толщины столбчатой и губчатой паренхимы. В то же время в опыте отмечается уменьшение толщины верхней кутикулы в базальной части листовой пластинки.

Экофизиологические эффекты при действии меди на древесные растения

В водной культуре, при развитии растений в условиях хронического загрязнения, дыхание листьев было существенно меньше соответствующего показателя для контрольных образцов – $152,8 \pm 4,5$ и $649,7 \pm 22,5$ мкл О₂/г сырой массы/ч. Динамика измене-

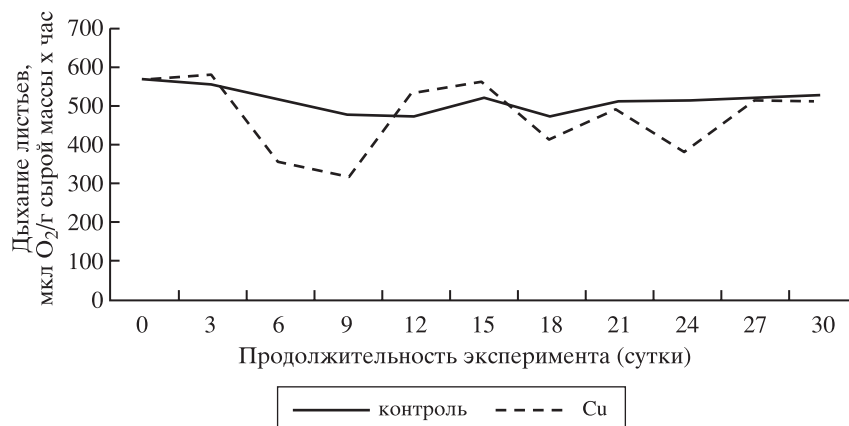


Рис. 49. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя balsamического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Cu^{2+} (песчаная культура)

ния дыхания листьев тополя после однократной обработки растений растворами с содержанием ионов меди в сравнении с контролем показана на рис. 49.

Так, при однократном действии на растения тополя ионов Cu^{2+} наблюдается снижение значений дыхания на 6–9-е сут. эксперимента относительно контроля. Далее происходит резкое увеличение – 12-е и 15-е сут. и затем повторное уменьшение дыхания листьев – 18–24-е сут. эксперимента. На 27-е сут. эксперимента происходит нормализация дыхания листьев опытных растений.

Установлено, что содержание хлорофилла А в листьях опытных растений тополя в 10 раз меньше относительно контроля в условиях хронического загрязнения окружающей среды медью. Содержание хлорофилла В в опыте в семь раз меньше по сравнению с контролем, при этом количество каротиноидов в листьях опытных растений, в среднем, на 20% меньше, чем в контроле. Суммарное содержание пигментов в листьях растений, развивающихся при хроническом загрязнении среды ионами Cu^{2+} в 4,5 раза меньше по отношению к контрольным показателям.

Изменения содержания пигментов в листьях тополей после однократной их обработки растворами с избыточным содержанием Cu^{2+} показаны на рис. 50–53.

Резкое увеличение содержания ионов Cu^{2+} в растительном субстрате приводит к снижению содержания хлорофилла А в листьях опытных растений на третьи сут. эксперимента. На шестые сут. отмечается повышенное, по сравнению с контролем, содержание пигмента в листьях опытных растений тополя. Однако на

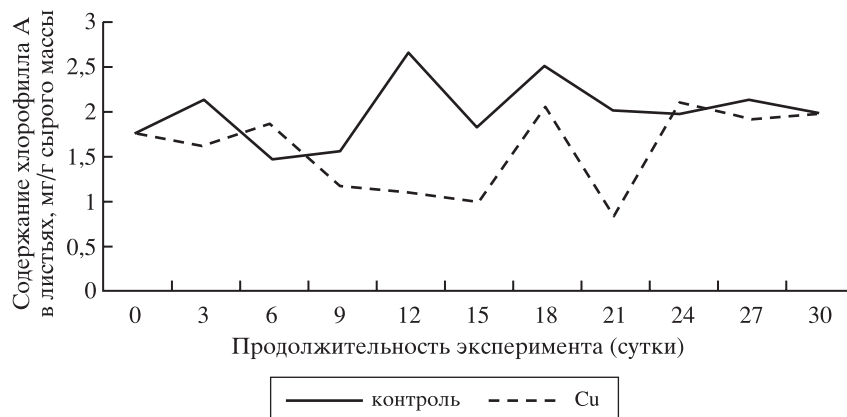


Рис. 50. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Cu^{2+} (песчаная культура)

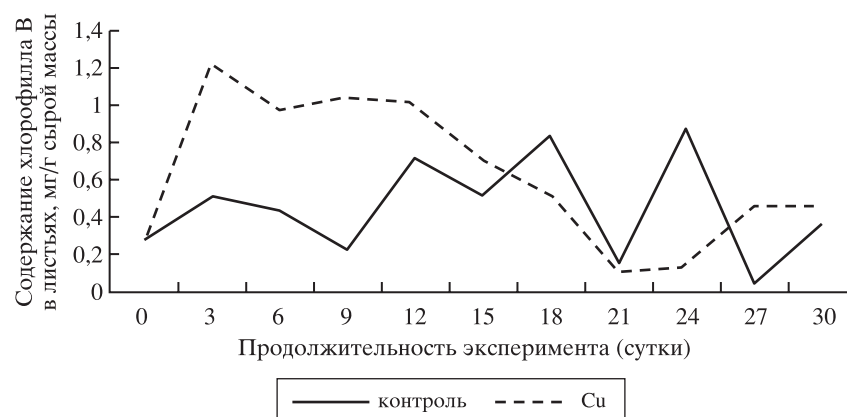


Рис. 51. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Cu^{2+} (песчаная культура)

9–15-е сут. происходит постепенное снижение хлорофилла А, после чего отмечались скачкообразные изменения содержания пигмента в листьях опытных растений. На 24-е сут. эксперимента происходит нормализация содержания хлорофилла А в листьях опытных растений.

Содержание хлорофилла В в листьях тополя резко возрастает уже на третьи сутки после обработки растений ацетатом Cu^{2+} (сублетальная концентрация). Повышенный уровень содержания

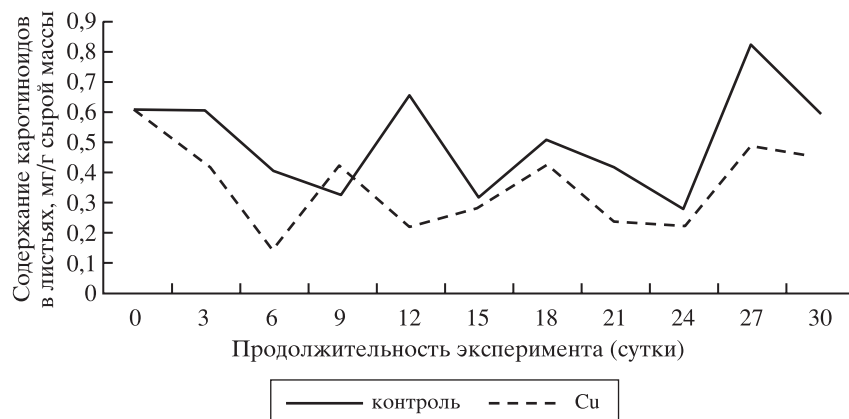


Рис. 52. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Cu^{2+} (песчаная культура)

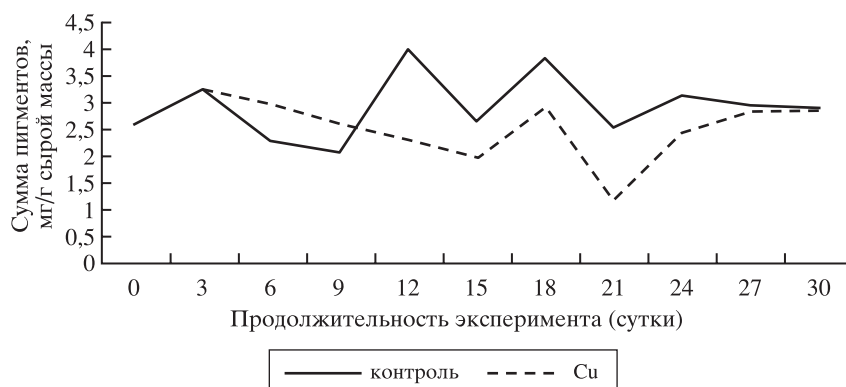


Рис. 53. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Cu^{2+} (песчаная культура)

пигмента в листьях опытных растений сохранялся вплоть до 15-х сут. эксперимента. На 18–24-е сут. содержание хлорофилла В в листьях опытных растений начало резко снижаться. Затем наблюдалось увеличение содержания пигмента в листьях опытных растений – 27-е сут. и к 30-м сутк. эксперимента количество хлорофилла В в листьях опытных растений было несколько выше по сравнению с контрольным значением.

Содержание каротиноидов в листьях тополя бальзамического после однократного действия сублетальных концентраций

Cu^{2+} снижается на 3–6-е сут., увеличивается на 9-е сут. и вновь снижается на 12–30-е сут. эксперимента по сравнению с контролем. Показано, что содержание каротиноидов в листьях опытных растений на протяжении большей части эксперимента значительно ниже относительно контрольных показателей.

Ионы Cu^{2+} оказывают негативное влияние на суммарное содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях тополя бальзамического, выражающееся в увеличении – на 6-е и 9-е сут. и снижении – на 12–27-е сут. эксперимента уровня пигментов в опытных образцах по сравнению с контрольными показателями. На 30-е сут. эксперимента суммарное количество пигментов фотосинтеза не отличалось в листьях контрольных и опытных растений (достоверных различий не обнаружено).

ЦИНК

Характеристика элемента. Элемент II группы периодической системы. Атомный номер 30. Природные изотопы: ^{64}Zn (48,89%), ^{66}Zn (27,81%), ^{67}Zn (4,11%), ^{68}Zn (18,57%), ^{70}Zn (0,62%). Металл. Чистый цинк пластичен, прокатывается в листы и тонкую фольгу. Металл технической чистоты на холоду не пластичен. Цинк диамагнитен [Вредные..., 1988; Алексеев, 1987].

Содержание в природе. Цинк относится к группе рассеянных элементов; содержание его в земной коре $1,5 \cdot 10^{-2}\%$ при кларке 83/10⁻⁴%. Из 64 минералов цинка наибольшее промышленное значение имеют сфалерит (цинковая обманка ZnS , цинкит ZnO , смитсонит ZnCO_3 , вюрцит ZnS , каламин $\text{Zn}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2$, госларит $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Цинк широко распространен во всех геосферах. Основная масса цинка мигрирует через гидросферу Земли. Содержание растворенных форм цинка в Мировом океане составляет 6850 млн т. Цинк относится к наиболее распространенным токсическим компонентам крупномасштабного загрязнения Мирового океана, о чем можно судить по его содержанию в настоящее время в 10-см поверхностном слое морской воды, где оно достигает 1020 мкг/л. Верхним порогом экологической толерантности для океанов и внутренних морей принято считать 50 мкг/л. Годовой глобальный вынос цинк с речными водами составляет 740 тыс. т при средней концентрации его 20 мкг/л. Годовой захват цинка железомарганцевыми конкрециями океана превышает 2,8 тыс. т в год. Среднее содержание цинка в почвах мира $5 \cdot 10^{-3}\%$. В массе живого вещества планеты содержится 500 млн т цинка, в том числе в наземной растительности 125 млн т. Захват цинка годовым приростом фитомассы составляет 57,5 кг на 1 км²; $K_6 = 19,6$. Вместе с медью и свинцом цинк

занимает первое место среди рассеянных элементов по интенсивности поглощения биотой океана. Содержание цинка в морских водорослях 15,0 мг/100 г сухого вещества; в наземных растениях 10,0; в морских животных 0,6–150,0; наземных животных 16,0; в бактериях 0,1–28,0. Интенсивно аккумулируют цинк водные растения, брюхоногие моллюски и особенно клоп-гладыш, содержание цинка в котором достигает 141 мг/кг сухого вещества при концентрации его в воде $5,1 \cdot 10^{-3}$ мг/л. Накопителем-биоиндикатором атмосферного загрязнения цинка могут служить мхи, содержание металла в которых вблизи предприятий цветной металлургии составляет 0,860 мг/г [Каплунова, 1983; Вредные ..., 1988].

Роль цинка в жизни животных и человека

Цинк как один из биогенных элементов постоянно присутствует в тканях животных. Среднее содержание цинка в большинстве наземных и морских организмов – тысячные доли процента. Богаты цинком некоторые беспозвоночные морские животные, например, устрицы (0,4% сухой массы). Суточная потребность человека в цинке (5–20 мг) покрывается за счет хлебобулочных изделий, мяса, молока, овощей; у грудных детей потребность в цинке (4–6 мг) удовлетворяется за счет грудного молока [Вредные..., 1988].

Биологическая роль цинка связана с его участием в ферментативных реакциях, протекающих в клетках. Он входит в состав карбоангидразы, различных дегидрогеназ, фосфатаз, связанных с дыханием и другими физиологическими, протеиназ и пептидаз, участвующих в белковом обмене, ферментов нуклеинового обмена (РНК- и ДНК-полимераз). Цинк играет существенную роль в синтезе молекул информационной РНК на соответствующих участках ДНК, в стабилизации рибосом и биополимеров. У животных, помимо участия в дыхании и нуклеиновом обмене, цинк повышает деятельность половых желез, влияет на формирование скелета плода. Показано, что недостаток цинка уменьшает содержание РНК и синтез белка в мозге, замедляет развитие мозга. Цинк играет защитную роль в организме при загрязнении среды кадмием [Вредные..., 1988].

Значение цинка в жизни растений

Zn необходим для функционирования ряда ферментов гликолиза – гексокиназы, енолазы, альдолазы, триозофосфатдегидрогеназы, активирует карбоангидразу. Цинк имеет важное значение в образовании аминокислоты триптофана. Таким об-

разом, Zn влияет на синтез ауксина, предшественником которого является триптофан. В растительных клетках Zn концентрируется в ядре и митохондриях. Способствует более полному использованию углекислого газа в фотосинтезе, влияет на синтез белков и ауксина. При недостатке Zn нарушается фосфорный обмен, накапливаются редуцирующие сахара, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, увеличивается содержание органических кислот и небелкового азота. Симптомами недостаточности Zn являются мелколистность и розеточность листьев, хлорозы и задержка роста [Гудков и др., 1986; Алексеев, 1987; Гуральчук, 1990].

Установлено, что Zn активнее накапливается в злаках, чем в бобовых [Алексеев, 1987]. Zn также накапливается в листьях, репродуктивных органах и конусах нарастания.

Уровень цинка, снижающий урожай или высоту на 5–10%, считается токсичным и составляет для овса 435–725 мг/кг, для клевера 210–290, для свеклы 240–275 [Большаков и др., 1978]. Известны растения, которые обладают способностью концентрировать цинк, например, гвоздичные (до 1500–4900 мг/кг сухого вещества), крестоцветные (до 5440–13630 мг/кг) [Вредные..., 1988].

Многие исследователи отмечают слабую фитотоксичность Zn [Алексеев, 1987]. При избытке Zn проявляются хлороз и ослабление роста, но большинство видов растений обладают высокой толерантностью к избытку Zn в среде. Отмечено, что техногенное загрязнение влияет на уровень содержания Zn в растительных тканях [Гончарук, 1977]: при избыточном содержании Zn в почве снижается урожай зерновых, картофеля, свеклы [Вредные..., 1988].

Нет единого мнения относительно нормального содержания Zn в растениях. По данным разных авторов оно варьирует от 15,0 до 150,0 мг/кг сухого. ПДК Zn для растений установлены в пределах от 150,0 до 300,0 мг/кг при уровне фитотоксичности более 400,0 мг/кг [Прохорова и др., 1998].

Максимальная концентрация Zn выявлена в листьях тополя черного (110,72 мг/кг). Довольно высока она в листьях осины (61,24 мг/кг) и ивы белой (50,90 мг/кг). В условиях лесостепного и степного Поволжья представители рода Тополь и семейства Ивовых являются главными концентраторами Zn [Прохорова и др., 1998].

Ю.В. Алексеев [1987] отмечает, что цинк обладает слабой фитотоксичностью, которая обнаруживается только при существенном увеличении его содержания в почве. Так, на почвах с малой емкостью катионного поглощения токсичный эффект цинка наблюдается при поступлении его в количествах 400–700 кг/га, а

на почвах с большей емкостью поглощения – 2000 кг/га. Появление признаков токсичности цинка у растений наступает при содержании его в тканях 300–500 мг/кг сухого вещества. Обычное содержание цинка в частях растений, бедных хлорофиллом, 7–27 мг/кг сухого вещества, в материалах, богатых хлорофиллом, оно составляет 40–95 мг/кг. Содержание цинка в злаковых зерновых культурах меньше, чем в бобовых.

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания цинка в окружающей среде

Ионы цинка не оказывают значительного влияния на сроки (шесть суток опыт и контроль) и массовость (85% растений, у которых раскрылись все живые почки) распускания листьев при выращивании растений в водных растворах ацетатов цинка. Установлено, что рост листьев был непродолжительным, а площадь листовой пластинки не превышала 200 мм². Скорость и продолжительность роста листьев тополя показана на рис. 54.

В условиях хронического загрязнения корневая система у тополей при действии цинка начинает формироваться с 20-суточной задержкой по сравнению с контролем. После однократной обработки растений тополя растворами солей цинка наблюдается стимуляция развития корневой системы – количество корней первого порядка увеличивается на 35% при увеличении их общей длины на 60%, масса корневых систем возрастает в 1,2 раза.

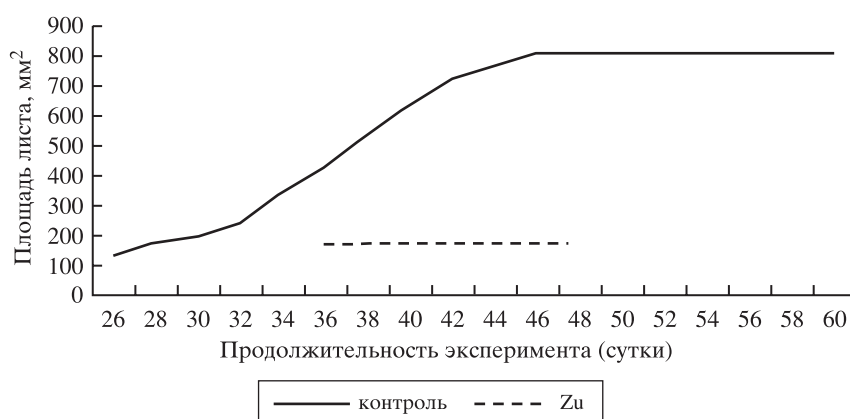


Рис. 54. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Zn^{2+} (водная культура)

Аккумуляция цинка в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

Содержание цинка в различных органах древесных растений показано в табл. 13.

Установлено, что накопление цинка в органах березы находится в ряду: двухлетние побеги > трехлетние побеги > кора > корневая система. В наибольшей степени накопление цинка происходит в надземных органах березы бородавчатой. Однако следует отметить, что в молодых частях растений – в листьях и однолетних побегах цинк не концентрируется.

Анализ данных о количественном содержании цинка в различных органах лиственницы Сукачева показывает, что максимальное накопление этого элемента отмечается в трех- и однолетних побегах – до 241 ppm и 199 ppm соответственно. Содержание цинка в корнях, не превышает 90 ppm, коре и побегах – 50 ppm.

При произрастании сосны обыкновенной на отвалах золоторудных месторождений цинк обнаруживается в органах лишь в следовых количествах. Однако содержание цинка исчисляется десятками ppm при произрастании на отвалах марганцевого месторождения (табл. 14).

Установлено, что многолетние части березы бородавчатой способны аккумулировать значительные количества цинка. В частности, корневые системы березы содержат до 1420 ppm Zn, при

Таблица 13

Содержание цинка (ppm) в различных органах березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.) и лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.), произрастающих на отвалах буроугольного месторождения (Башкирское Предуралье)

Вид		Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева
Ассимиляционные органы	1-й год	следы	–
	2-й год	–	–
	3-й год	–	–
Побеги	1-й год	следы	199±27,1
	2-й год	157±11,9	40±5,8
	3-й год	120±9,4	241±31,4
Кора (на высоте 1,3 м)		92±7,7	34±4,9
Корни (на глубине 0–20 см)		82±7,9	86±7,2
Грунт под насаждением		следы	77±21,9
Грунт необлесенного участка			11±3,4

Таблица 14

**Содержание цинка (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Zn
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	56
	Внешний слой коры	90
	Внутренний слой коры	220
	Древесина	28
	Корень	140
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	0
	Внешний слой коры	28
	Внутренний слой коры	31
	Древесина	0
	Корень	1420
Контроль оз. Узункуль	Листья	59
	Кора	70
	Древесина	17
	Корень	47
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	140
	Кора	83
	Древесина	389
	Корень	74
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	5,6
	Внешний слой коры	67
	Внутренний слой коры	218
	Древесина	0
	Корень	100
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	93
	Кора	42
	Древесина	115
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	0
	Кора	0
	Корень	0

Таблица 15

**Содержание цинка (ppm) в почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Zn
Карьер Красовского хромитового месторождения	0
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	242
Контроль оз. Узункуль	0

том, что в листьях и древесине цинк может обнаруживаться лишь в следовых количествах (табл. 14).

В отвальных грунтах марганцевого месторождения содержание цинка составляет 242 ppm, при следовом фоновом содержании данного металла в почвах (табл. 15).

Изучение содержания цинка в древесных породах промцентров Башкирского Зауралья позволило установить, что содержание цинка в листьях (хвое) на пробных площадях варьирует от 10,3 ppm сухого вещества для тополя до 87,6 ppm для сосны на черноземе южном, в ветвях – от 63,4 ppm у тополя до 108,7 ppm у сосны на черноземе южном, в корнях – от 71,5 ppm для тополя до 206 ppm для сосны на черноземе южном. Наиболее часто встречаются величины 70–80 ppm на выщелоченном и обыкновенном, 75–100 ppm на южном подтипах черноземов.

Наибольшее количество металла отмечено в корнях древесных видов, наименьшее – в листьях (хвое). Ветви по данному показателю занимают промежуточное положение (рис. 55, 56). В целом, на исследованных пробных площадках среднее значение содержания цинка составляет в корнях 87,62 ppm, ветвях – 79,26, листьях (хвое) – 58,41. При этом отмечено, что хвоя, ветви и корни сосны содержат больше цинка, чем аналогичные органы тополя и березы (рис. 57).

Результаты дисперсионного анализа показали, что у сосны разница между содержанием цинка в хвое, ветвях и корнях является существенной ($d > \text{НСР}_{05}$). У тополя наблюдается разница между количеством металла в листьях и ветвях, листьях и корнях, однако для ветвей и корней такая разница незначительная. У березы разница между содержанием цинка в листьях, ветвях и корнях незначительна ($d < \text{НСР}_{05}$).

С помощью дисперсионного анализа установлено, что у изученных древесных пород наблюдается существенная разница между содержанием металла в листьях (хвое) и ветвях, листьях (хвое) и корнях. Для ветвей и корней разница незначима. У исследованных пород, как и в случае с медью, различия в содержании

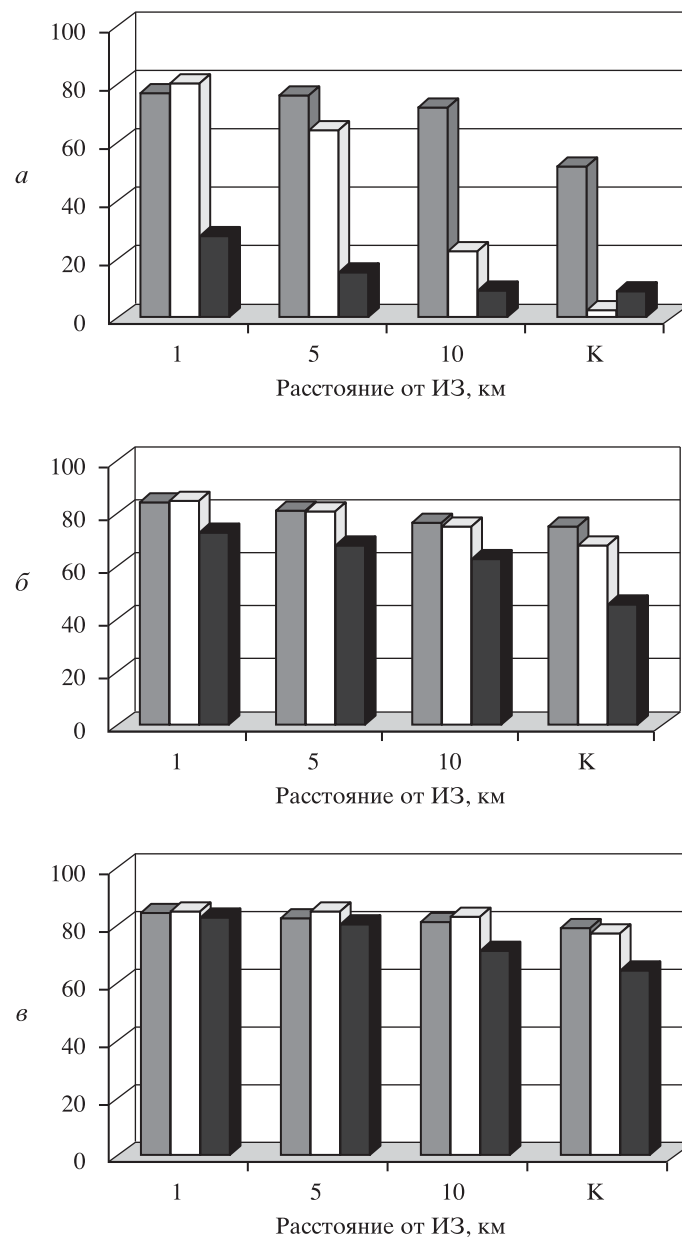


Рис. 55. Содержание цинка (ppm) в тополе черном (*Populus nigra* L.) на черноземах Башкирского Зауралья
 А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

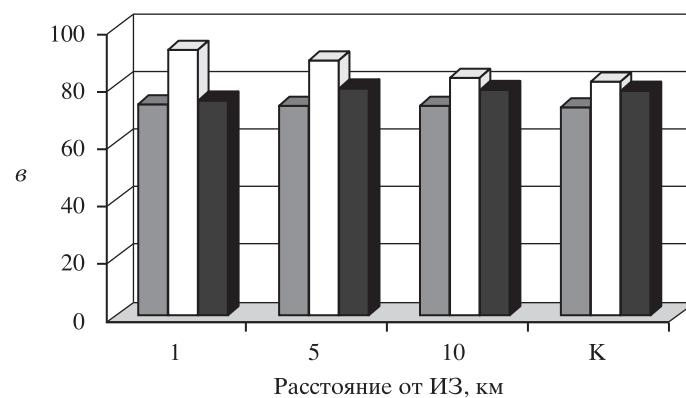
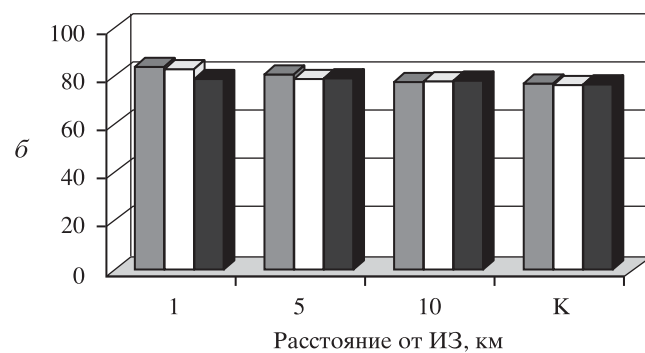
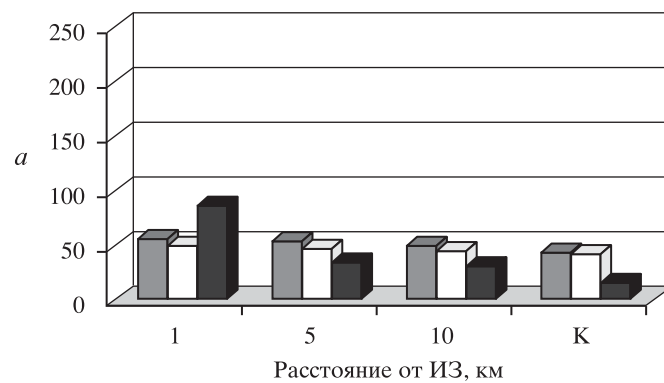


Рис. 56. Содержание цинка (ppm) в сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на черноземах Башкирского Зауралья
 А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

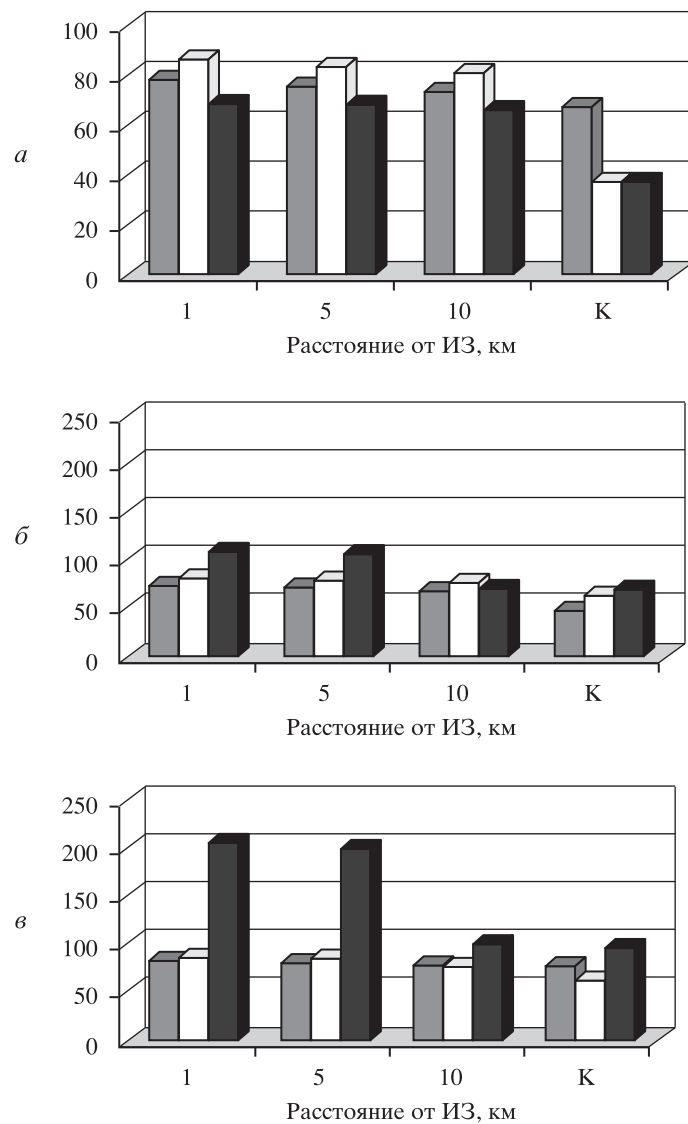


Рис. 57. Содержание цинка (ppm) в березе бородавчатой (*Betula pendula* Roth.) на черноземах Башкирского Зауралья

А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

цинка несущественны. Выявлены существенные различия между количеством металла в хвое сосны и листьях березы, а также в листьях тополя и березы. Разница между содержанием цинка в ветвях тополя, сосны, березы не является значимой. Аналогичная картина отмечена и для корней древесных пород.

Как и в случае с медью, содержание цинка в древесных породах на всех пробных площадках превосходит показатели условного контроля, что вызвано усилением техногенного влияния по мере приближения к ГОК.

Следует отметить, что несмотря на повышенное содержание цинка по сравнению с другими органами, корни древесных видов отличаются низкой аккумулярующей способностью. Из рис. 57 видно, что в непосредственной близости от ГОК корни березы содержат меньше металла по сравнению с условным контролем. По нашим данным K_a для корней древесных пород колеблется в пределах 1–1,2, достигая максимальных значений (1,8) у сосны на черноземе южном.

Наибольшей интенсивностью поглощения цинка характеризуются листья (хвоя). Об этом свидетельствует величина коэффициента аккумуляции. К примеру, на черноземе обыкновенном в радиусе 10 км от ИЗ величина K_a для листьев тополя изменяется в пределах от 7,4 до 25,2; для хвои на черноземе южном – от 2 до 5,4. Отмечено, что ветви имеют незначительную величину K_a , в среднем равную 1,2.

Таким образом, по металлоаккумуляционной способности в отношении цинка органы исследованных древесных пород образуют следующий ряд: листья > ветви > корни. По содержанию металла органы древесных пород располагаются в обратной последовательности: корни > ветви > листья.

По интенсивности накопления цинка древесные породы БЗ образуют ряд: тополь черный > сосна обыкновенная > береза бородавчатая.

Максимальное количество цинка обнаружено в древесных породах, произрастающих на черноземе южном, затем в порядке убывания – на обыкновенном и выщелоченном подтипах.

Исследования показали, что на черноземе выщелоченном наибольшие количества цинка депонируются в тополе, на обыкновенном черноземе – в березе, на южном – в сосне. Причем, на всех пробных площадях высокое содержание металла отмечено в корнях и ветвях деревьев.

Анализ интенсивности поглощения цинка исследованными видами, показывает, что высокой аккумулярующей способностью по отношению к данному металлу обладает тополь, произрастающий на обыкновенном черноземе, а также сосна обыкновенная на черноземе южном.

Таким образом, если корни и ветви деревьев депонируют цинк в больших количествах, то по интенсивности поглощения металла они уступают листьям (хвое). Наибольшая металлоаккумуляционная способность отмечена у тополя на черноземе обыкновенном (величина K_a у листьев достигает 25,2). Сосна, произрастающая на южном черноземе, также способна поглощать значительное количество цинка (величина K_a у хвои достигает 5,4). Минимальная интенсивность к металлоаккумуляции отмечена у видов, произрастающих на черноземе выщелоченном (величина K_a составляет 1,1).

Таким образом, в условиях загрязнения окружающей среды предприятиями цветной металлургии листья изученных древесных пород интенсивно аккумулируют цинк. Ветви и корни служат в качестве депо для металлов, ограничивая их распространение в окружающую среду.

Цинк относится к основным компонентам медноколчеданных месторождений и является биологически необходимым микроэлементом, оказывающим в высоких концентрациях вредное воздействие на биоту. Анализ данных о содержании цинка в исследованных почвах позволяет также заключить, что его накопление определяется расстоянием от источника загрязнения и производственными мощностями ГОКов. По мере удаления от ИЗ происходит закономерное снижение концентрации металла в пахотном (0-30 см) горизонте черноземов. Причем на черноземах обыкновенных (в зоне воздействия БМСК, имеющем большие объемы производства по сравнению с остальными ГОК) вновь ярко проявилась аккумуляция металла во всех исследованных горизонтах. По содержанию валовых форм цинка все изученные подтипы черноземов имеют слабый (первый) уровень загрязненности [по Важнину, 1987]. Лишь в непосредственной близости от ИЗ на черноземе обыкновенном наблюдается умеренный (второй) уровень загрязнения. Оценивая состояние загрязнения цинком [Добровольский, 1999] почв в радиусе 10 км от ИЗ, можно сделать вывод, что черноземы БЗ на всех участках имеют умеренное загрязнение валовыми формами металла.

Более тревожная картина складывается по аккумуляции подвижного цинка, особенно в черноземе обыкновенном. Так, в радиусе 5 км от БМСК почва имеет очень высокий (шестой) уровень загрязненности [по Важнину, 1987] и очень сильную категорию загрязнения [по Добровольскому, 1999]. В непосредственной близости от ИЗ пахотный слой чернозема выщелоченного имеет среднее загрязнение (третий уровень) активными формами цинка, при этом, согласно И.Г. Важнину [1987], ухудшаются

агрохимические свойства почвы, нарушается нормальная жизнедеятельность и химический состав растительности. На остальных площадках с черноземами выщелоченными и южными наблюдается слабое и умеренное загрязнение.

Сопоставление содержания в почве цинка с ПДК, при учете высокой степени токсичности данного металла, показало, что в непосредственной близости от ГОКа в черноземе выщелоченном имеет место превышение по валовым формам до 2ПДК (вторая степень химической деградации почв) [Система оценки..., 1992], хотя содержание подвижных форм на всех пробных площадках находится в рамках предельно допустимой концентрации. В пахотном слое чернозема обыкновенного превышение ПДК по валовым формам цинка в два раза отмечено в радиусе 5 км, по подвижным (в 1,4–6,3 раза) – в радиусе 10 км. На черноземе южном превышения ПДК по валовым и подвижным формам металла не отмечено.

При сравнении содержания валовых форм цинка во всех исследованных подтипах черноземов с РГФ не установлено превышения над данным показателем, составляющим 223 мг/кг [Оценка экологического..., 2001]. Однако при сопоставлении с РГФ для подвижных форм металла, составляющим 3,1 мг/кг, выявлено его превышение на всех пробных площадках исследованных черноземов и даже на условном контроле. Исключение составляет лишь условный контроль с черноземами южными. Так, в слое 0–30 см чернозема обыкновенного превышение над РГФ составляет от 1,9 до 47 раз.

За исключением условного контроля и пробной площади на удалении 10 км от источника загрязнения на черноземе южном, в пахотном горизонте исследованных почв отмечено превышение содержания валовых форм цинка над фоновым показателем, составляющим 68 мг/кг [Яковлев и др., 1993].

В целом, черноземы БЗ, находящиеся в зоне влияния предприятий цветной металлургии, слабо загрязнены валовым цинком. По содержанию подвижных форм металла, как и в случае с медью, в радиусе 5 км от ГОК черноземы обыкновенные загрязнены очень сильно, черноземы выщелоченные и южные – умеренно. Импактная (загрязненная) зона на черноземе обыкновенном располагается в радиусе 5 км, на черноземах выщелоченном и южном – в непосредственной близости от ИЗ. Это позволяет выделить данные зоны в качестве техногенных провинций по содержанию цинка. Большая протяженность импактной зоны на черноземе обыкновенном объясняется повышенной техногенной нагрузкой БМСК на прилегающую территорию по сравнению с УГОК и Бурибаевским РУ.

По суммарному накоплению цинка зональные подтипы черноземов БЗ образуют следующий ряд: обыкновенные > выщелоченные > южные.

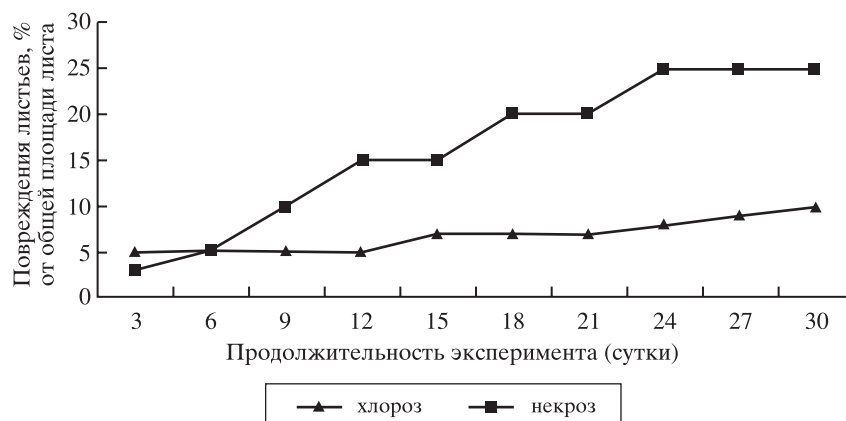


Рис. 58. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Zn^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием цинка

В условиях вегетационного опыта в водной культуре при действии на растения тополя ионов цинка отмечено появление видимых повреждений листьев только в виде хлорозов по центральной жилке – у 60% листьев экспериментальных растений. В условиях песчаной культуры отмечается резкое увеличение площади некрозов при незначительном увеличении площади хлорозов (рис. 58).

Анатомо-морфологические особенности растений при действии цинка

Ионы цинка оказывают эффект увеличения относительной длины жилок на листьях тополя бальзамического в наибольшей степени по сравнению с другими металлами. Так, установлено, что длина жилок в апикальной, срединной и базальной частях листа остается одинаковой и составляет $1,13 \pm 0,01$ мм/мм², что значительно больше контрольного показателя – $0,85 \pm 0,01$ мм/мм². Ионы цинка также оказывают влияние на увеличение относительного количества устьиц на листьях тополя. Для контрольных растений этот показатель равняется 445, а для опытных – 554 шт/мм².

Толщина листьев тополя снижается в среднем на 15% под действием ионов цинка. Следует отметить, что уменьшение, как

и в случае с другими ионами, по большей части обусловлено снижением толщины губчатой и столбчатой паренхимы. При этом достоверных различий между толщиной покровных тканей листьев экспериментальных и контрольных растений – кутикулы и эпидермиса не установлены.

Экофизиологические эффекты при действии цинка на древесные растения

Установлено, что ионы цинка в наибольшей степени угнетают дыхание листьев тополя в условиях хронического загрязнения. Значение дыхания листьев опытных растений составляет $112,0 \pm 11,8$ в то время как дыхание листьев контрольных растений – $649,7 \pm 22,5$ мкл O_2 /г сырой массы/ч. При этом, дыхание листьев тополя после однократной обработки мало отличается от дыхания листьев контрольных растений (рис. 59). Только на 9-е и 18-е сут. отмечалось понижение дыхания листьев опытных растений.

Содержание хлорофилла А в листьях тополя бальзамического после однократного действия сублетальных концентраций Zn^{2+} снижается на третьи сутки, повышается на 6-е сут. и вновь снижается на 9–15-е сут. эксперимента по сравнению с контролем. Отмечается, что на 18-е сут. эксперимента значение содержания пигмента в листьях контрольных и опытных растений одинаково. Затем происходит уменьшение (21-е сут.), увеличение (24-е сут.) и постепенная нормализация содержания хлорофилла А в листьях опытных растений относительно контрольных (рис. 60).

При действии ионов Zn^{2+} на растения тополя бальзамического отмечались следующие изменения содержания хлорофилла В в листьях – на третьи сутки эксперимента содержание пигмента в листьях опытных растений было значительно выше по сравнению с контрольными показателями, однако уже на 6-е сутки содержание пигмента резко сократилось (рис. 61). На 9-е и 12-е сут. эксперимента отмечалось повышенное по сравнению с контролем содержание хлорофилла В в листьях опытных растений. К 15-м сут. эксперимента достоверных различий между значениями содержания пигмента в опытных и контрольных образцах листьев не обнаружены. В последующем установлены значительные различия между содержанием хлорофилла В в листьях опытных и контрольных растений и к концу эксперимента эти различия сохранялись.

Резкое увеличение содержания ионов Zn^{2+} в растительном субстрате приводит к снижению содержания каротиноидов в листьях опытных растений на 3-и сутки эксперимента (рис. 62). Од-

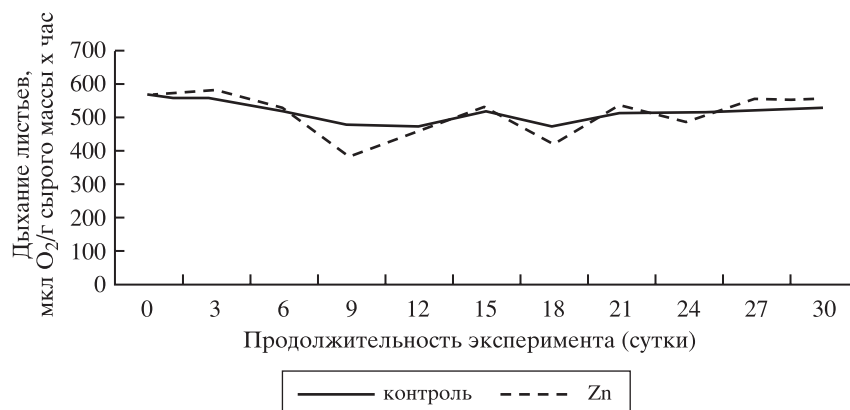


Рис. 59. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Zn²⁺ (песчаная культура)

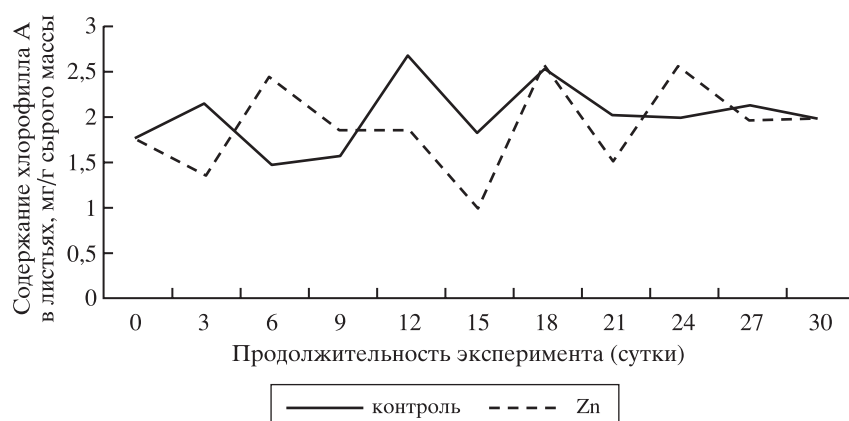


Рис. 60. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Zn²⁺ (песчаная культура)

нако на 6–15-е сут. отмечается повышение содержания каротиноидов в листьях опытных растений тополя. На 18-е сут. происходит постепенное снижение каротиноидов в листьях опытных растений, которое продолжается до 21-х сут. эксперимента. После чего отмечалось резкое увеличение содержания каротиноидов в листьях опытных растений и к концу эксперимента содержание каротиноидов в листьях контрольных растений ниже по сравнению с опытными образцами.

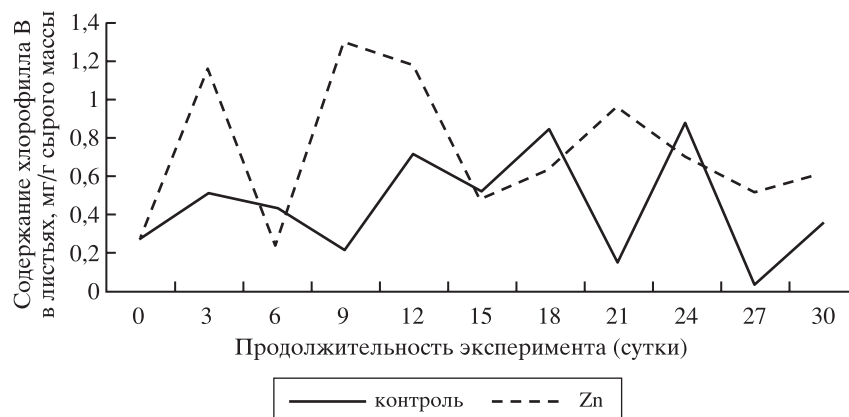


Рис. 61. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Zn^{2+} (песчаная культура)

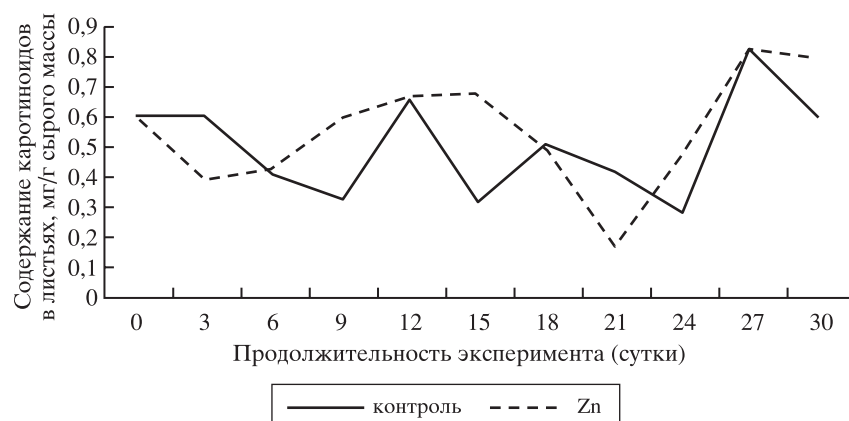


Рис. 62. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Zn^{2+} (песчаная культура)

Суммарное содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях опытных растений снижается относительно контрольных показателей на третьи сутки эксперимента при действии Zn^{2+} . Затем происходит увеличение содержания пигментов в листьях опытных растений – 6-е и 9-е сут. эксперимента. На 12-18-е сут. отмечалось незначительное снижение уровня пигментов в листьях опытных растений по отношению к контролю. К концу эксперимента отмечается повышенное суммарное содержание пигментов.

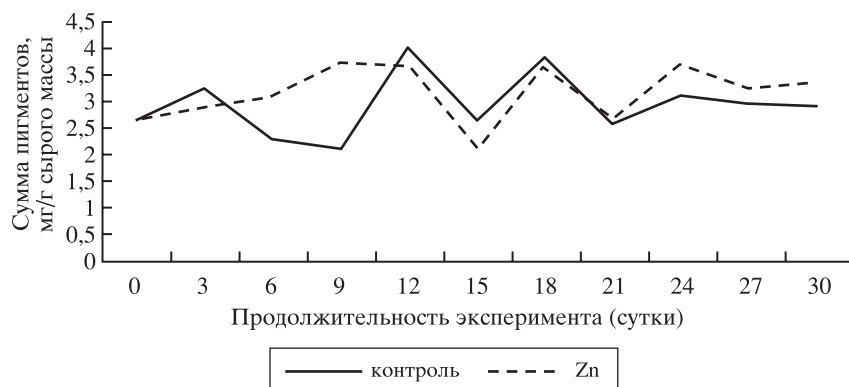


Рис. 63. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Zn^{2+} (песчаная культура)

тов в листьях опытных растений относительно контрольных образцов.

При хроническом загрязнении окружающей среды ионами Zn^{2+} отмечается двукратное снижение содержания пигментов фотосинтеза в листьях тополя по сравнению с контролем. Снижение происходит в основном за счет хлорофилла А, содержание которого в листьях экспериментальных растений значительно меньше по сравнению с контролем – $0,0594 \pm 0,0164$ и $0,4726 \pm 0,0041$ мг/г сырой массы, а также за счет хлорофилла В – $0,1703 \pm 0,0659$ и $0,2879 \pm 0,0042$ мг/г сырой массы листа. Содержание каротиноидов в листьях опытных растений было несколько выше, чем в контрольных – $0,2082 \pm 0,0139$ и $0,1726 \pm 0,0009$ мг/г сырой массы листа.

СВИНЕЦ

Характеристика элемента. Элемент IV группы. Атомный номер 82. Атомная масса 207,2. В природе имеются пять стабильных изотопов с массовыми числами 202 (следы), 204 (1,5%), 206 (23,6%), 207 (22,6%), 208 (52,3%). Металл, обладает высокими теплопроводностью и электропроводностью, легко поддается ковке. Свинец представляет собой синевато-серый мягкий и легкоплавкий металл, устойчивый к действию агрессивных газов, спиртов, кислот, поэтому из него готовят различные части заводской аппаратуры, а также мягкие сплавы и аккумуляторы [Алексеев, 1987; Бандман и др., 1988; Вредные ..., 1988].

Содержание в природе. Содержание Pb в земной коре (кларк) $1,6 \cdot 10^{-3}\%$ по массе. Известны около 80 различных минералов Pb, главный из которых галенит PbS. Встречается он только в виде минералов – свинцового блеска – PbS, англезита – PbSO₄ [Бандман и др., 1988].

В биосфере Pb в основном рассеивается, его мало в живом веществе ($5 \cdot 10^{-5}\%$), в морской воде ($3 \cdot 10^{-9}\%$). Из природных вод Pb отчасти сорбируется глинами и осаждается сероводородом, поэтому он накапливается в морских илах [Вредные ..., 1988; Patterson, 1971].

В почве свинца содержится около $5 \cdot 10^{-4}\%$. В местностях, где имеется свинцовоперерабатывающая промышленность, количества его в почвах и особенно в сточных водах резко увеличивается. Среднее содержание свинца в пресных и морских водах составляет около 0,004 мг/л. Предельно допустимая концентрация его в питьевых водах – 0,1 мг/г [Вредные ..., 1988].

Геохимия свинца и его физиологическая роль в полной мере не изучены. Известно, что он всегда входит в состав организмов. Можно предполагать, что растения могут извлечь довольно полно из питательного раствора марганец, медь, свинец, а также и другие элементы, находящиеся в ничтожных количествах [Вредные ..., 1988].

Роль свинца в жизни животных и человека

В организм животных и человека свинец попадает с пищей (около 0,22 мг), с водой (0,1 мг) и пылью (до 0,1 мг). Безопасный суточный уровень поступления свинца для человека – 0,2–2 мг. Выделяется свинец, главным образом с калом (0,22–0,32 мг), меньше с мочой (0,03–0,05 мг). В теле человека, в среднем, содержится около 2 мг свинца (иногда – до 200 мг). У городских жителей содержание свинца в организме как правило выше по сравнению с сельскими жителями. Основное депо свинца в организме – скелет – до 90% всего свинца в организме содержится именно здесь. В печени накапливается 0,2 – 1,9 мкг/г; в крови – 0,15–0,4 мкг/г. Свинец также обнаруживается в поджелудочной железе, почках, головном мозге и других органах. При повышении уровня свинца в окружающей среде возрастает его отложение в костях, волосах, печени. Свинец и его соединения проникают в организм человека, в основном, через дыхательные пути, в меньшей степени через желудочно-кишечный тракт и кожу. В развитии интоксикации играют роль нарушение порфиринового, белкового, нуклеинового и фосфатного обменов, дефицит витаминов С и В₁, функциональные

и органические изменения центральной и вегетативной нервной системы, токсическое влияние свинца на костный мозг. Отравления могут быть скрытыми, протекать в легкой, средней тяжести и тяжелой формах. Наиболее частые признаки отравления: кайма по краю десен, землисто-бледная окраска кожных покровов, ретикулоцитоз, поражения нервной системы (параличи и т.д.), резкие схваткообразные боли в животе, поражения печени, сердечно-сосудистой системы, нарушения эндокринных функций и т.д. [Вредные ..., 1988].

Значение свинца в жизни растений

По мнению большинства исследователей, биологическая роль Pb невелика. Установлено, что он входит в состав физиологически активных соединений. Повышенное содержание Pb вызывает функциональные нарушения в пигментных комплексах и уменьшение содержания хлорофилла в тканях. У растений под влиянием Pb угнетаются ростовые процессы, снижается содержание витамина С и провитамина А [Матвеев и др., 1997; Broyer et al., 1972].

Анализ отдельных частей овощных растений показал, что свинец находится в золе всех органов растений в количестве менее 0,001%. Свинец содержится в томатах, перце, луке, огурцах, капусте, моркови, картофеле и др. овощах. Свинец стимулирует прорастание семян капусты (на 50% по сравнению с контролем), томатов – на 8% и лук – 3%, способствует повышению хлорофилла в листьях картофеля (0,92% против 0,64% в контроле) [Власюк и др., 1974; Нестерова, 1989].

Данные о влиянии свинца на урожай и энергию прорастания овощных культур и картофеля, а также неодинаковое содержание его в различных органах плодово-ягодных растений свидетельствует об определенной физиологической роли данного металла, выяснение которой требует дальнейшего изучения [Власюк и др., 1974].

Для растений свинец представляет наименьшую опасность. Свинец может снижать подвижность в почве других металлов, например, молибдена, образуя с анионом молибденовой кислоты молибдат свинца $PbMoO_4$. Такое же действие он может оказать и на анионы хромовой кислоты, образуя хромат свинца и уменьшая подвижность шестивалентного хрома [Матвеев и др., 1997].

Невысокая фитотоксичность свинца объясняется наличием хорошо действующей в растении системы инактивации элемента, проникающего в корневую систему [Прохорова и др., 1998].

Однако очень высокие концентрации свинца в почвах могут существенно подавлять рост растений и вызвать хлороз, обусловленный нарушением поступления железа [Матвеев и др., 1997].

Нормальными для растений считаются концентрации Pb от 0,1 до 5,0 мг/кг сухого вещества, критической – 10,0 мг/кг, фитотоксичной – более 60,0 мг/кг. ПДК Pb для растений по сведениям разных авторов значительно отличаются: от 0,5–1,2 до 10,0–20,0 мг/кг сухого вещества. Нормальное содержание Pb в надземных органах трав определено в интервале от 1,5 до 14 мг/кг сухого вещества [Прохорова и др., 1998].

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания свинца в окружающей среде

Сублетальные дозы свинца оказывают стимулирующий эффект на рост листьев тополя в начале вегетации (рис. 64). Затем рост листьев опытных растений прекращается. Следует отметить, что при действии ионов свинца не происходит задержки распускания листьев тополя и у 85% растений из черенков раскрываются все почки.

Следует отметить, что в водной культуре у 100% растений корневая система начинает формироваться на 33-е сутки эксперимента. Установлено также, что количество корней первого порядка и их длина у тополей, после однократной обработки растений, снижаются на 25% по отношению к контрольным показателям. Однако общая масса корневых систем экспериментальных и контрольных растений достоверно не различается.

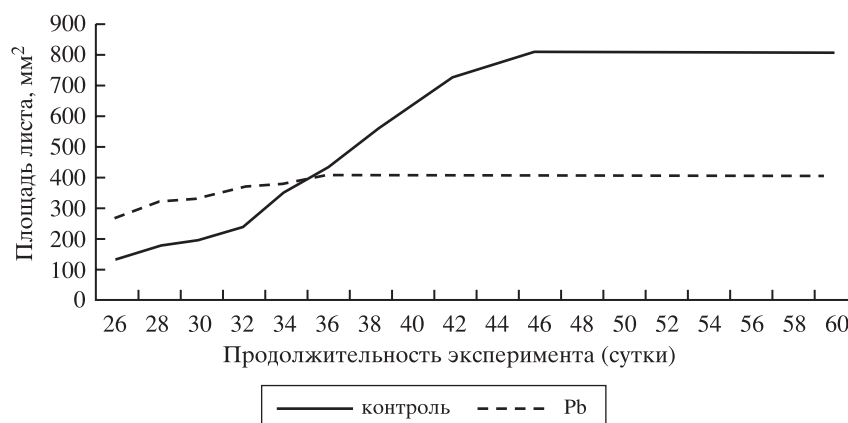


Рис. 64. Рост листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях засоления среды ацетатом Pb^{2+} (водная культура)

Аккумуляция свинца в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

Распределение свинца в различных органах древесных растений, произрастающих на отвалах бурогоугольного месторождения показано в табл. 16.

Установлено, что корневая система и кора являются основным местом депонирования свинца у березы бородавчатой: содержание этого металла в коре – 7,9 ppm, в корнях – 9,3 ppm. Двух- и трехлетние побеги также способны накапливать свинец, однако содержание металла в них значительно ниже по сравнению с корой и корневой системой: в двухлетних побегах 2,7 ppm, в трехлетних – 3,1 ppm. Показано, что в наиболее молодых частях березы бородавчатой свинец не накапливается.

В более старых частях лиственницы Сукачева накапливается наименьшее количество свинца, в частности, в трехлетних побегах (3,8 ppm). В наземных частях растения – в корневой системе и двухлетних побегах содержание свинца максимальное – до 12 ppm.

В ходе проведения анализов по определению свинца в различных органах сосны обыкновенной установлено, что данный

Таблица 16

Содержание свинца (ppm) в различных органах березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на отвалах бурогоугольного месторождения (Башкирское Предуралье)

Вид		Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Ассимиляционные органы	1-й год	следы	–	следы
	2-й год	–	–	следы
	3-й год	–	–	12±2,7
Побеги	1-й год	следы	6,7±1,8	следы
	2-й год	2,7±0,3	12±2,0	3,9±0,8
	3-й год	3,1±0,2	3,8±0,4	следы
Кора (на высоте 1,3м)		7,9±0,8	9,2±2,1	следы
Корни (на глубине 0–20 см)		9,3±1,7	12±1,7	23±3,0
Грунт под насаждением		13±4,7	19±5,3	10±3,0
Грунт необлесенного участка			1,5±0,4	

Таблица 3.13

**Содержание свинца (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Zn
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	1,2
	Внешний слой коры	0,2
	Внутренний слой коры	0,24
	Древесина	0,81
	Корень	1,8
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	5,6
	Внешний слой коры	4,1
	Внутренний слой коры	7,5
	Древесина	–
	Корень	6,7
Контроль оз. Узункуль	Листья	0,77
	Кора	0,7
	Древесина	0,23
	Корень	0,58
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	0,4
	Кора	3,6
	Древесина	2
	Корень	0,44
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	2,4
	Внешний слой коры	3,9
	Внутренний слой коры	1,5
	Древесина	6
	Корень	6,6
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	1,7
	Кора	2,7
	Древесина	0,23
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	4
	Кора	4,6
	Корень	0

Таблица 18

**Содержание свинца (ppm) в почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Pb
Карьер Красовского хромитового месторождения	9,2
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	43
Контроль оз. Узункуль	9,9

элемент содержится только в корневой системе (23 ppm), трехлетней хвое (12 ppm) и двухлетних побегах (3,9 ppm). В остальных органах сосны обыкновенной свинец не определяется. Вероятно, защитные механизмы сосны обыкновенной обеспечивают депонирование металла в корневой системе растения и не допускают проникновения и распределения свинца по растительному организму.

Показано, что у березы бородавчатой, произрастающей на отвалах хромитового месторождения, содержание свинца в десятки раз превышает соответствующий показатель для растений, произрастающих в карьере хромитового месторождения (табл. 17). При этом наблюдается сходство в схемах распределения данного элемента по органам березы – наибольшее количество металла аккумулируется в корневой системе и листьях, что в целом характерно для контроля.

Наибольшее накопление свинца наблюдается в коре, а наименьшее – в листьях и корневой системе березы, произрастающих на отвалах марганцевого месторождения. Установлено, что корневая система и древесина березы аккумулируют наибольшее количество свинца при произрастании растений на отвалах золоторудного месторождения.

В растениях сосны обыкновенной при произрастании как на отвалах марганцевого, так и на отвалах золоторудного месторождения отмечается одинаковая схема распределения свинца по органам – максимальное количество металла накапливается в коре.

По сравнению с древесными растениями в почвогрунтах на отвалах полиметаллических месторождений и в контроле (фон) содержание свинца очень велико (табл. 18). Следует отметить, что между фоновым содержанием свинца и его содержанием в грунтах карьера хромитового месторождения достоверных различий не отмечается. При этом отмечено увеличение содержания свинца более чем в 4,5 раза относительно фонового в отвальных грунтах марганцевого месторождения.

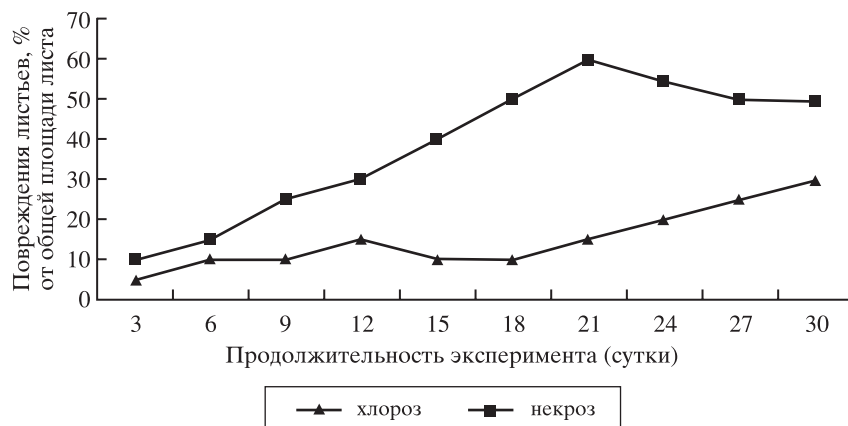


Рис. 65. Характер повреждений листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений раствором ацетата Pb^{2+} (сублетальная концентрация) (песчаная культура)

Повреждения органов древесных растений, вызванные действием свинца

Характер влияния ионов свинца на растения тополя в песчаной культуре представлен на рис. 65. Установлено, что ионы свинца обуславливают появление видимых повреждений в виде некрозов, площадь которых на листьях стремительно увеличивается до 21 сут. эксперимента. Повреждения в виде хлорозов являются редкими и их площадь на листьях невелика.

При избытке свинца в растительном субстрате (хроническое загрязнение) отмечено появление повреждений у 60% распустившихся листьев. Наиболее частыми повреждениями на листьях были хлорозы – у 50% листьев, в том числе краевые – до 30% площади листа, межжилковые и по центральной жилке – до 10%; некрозов отмечены у 10% листьев тополя. Среди некрозов следует выделить краевые, межжилковые и диффузные некрозные пятна – до 5% площади листа. Скручивание и усыхание листьев не обнаружено.

Анатомо-морфологические особенности растений при действии свинца

При действии ионов свинца на растения тополя бальзамического наблюдается уменьшение относительного количества устьиц на листьях более чем на 30%. Отмечается также и снижение относительной длины жилок на листьях опытных растений по сравнению с контролем – в среднем на 15%.

Ионы свинца обуславливают незначительное – (5%), но достоверное увеличение средне суммарной толщины листьев опытных растений относительно контроля. В основном, увеличение связано с изменением толщины губчатой и столбчатой паренхимы, но в базальной части кроме того отмечено увеличение толщины верхнего и нижнего эпидермиса.

Экофизиологические эффекты при действии свинца на древесные растения

Дыхание листьев растений тополя изменяется в значительной степени после обработки раствором с избыточным содержанием свинца (рис. 66). Так, уже на третьи сутки эксперимента показатель дыхания листьев понизился относительно контрольного значения. Снижение продолжалось до девяти суток. Далее наблюдалось достаточно резкое увеличение значения дыхания листьев опытных растений, которое достигло максимума к 15-м сут.; затем происходило снижение показателя дыхания (18–24-е сут. эксперимента) и его нормализация на 27-е сут. эксперимента.

Растения тополя проявляют высокую устойчивость к действию ионов свинца, что проявляется в форме незначительного, по сравнению с другими металлами, снижения показателя дыхания листьев – $532,0 \pm 18,4$ мкл O_2 /г сырой массы · ч, что составляет более 80% от контрольного значения.

На рис. 66–70 показана динамика изменений содержания пигментов фотосинтеза в листьях тополя бальзамического после однократного действия на растения ионов Pb^{2+} .

Под действием ионов Pb^{2+} содержание хлорофилла А в листьях тополя изменяется на шестые сутки эксперимента – происходит постепенное снижение содержания пигмента в листьях опытных растений: на 30-е сут. содержание хлорофилла А в листьях опытных растений значительно ниже по сравнению с контрольным значением.

В результате действия ионов Pb^{2+} изменения в содержании хлорофилла В наблюдаются на 3–12-е сут. эксперимента – отмечается значительное увеличение содержания пигмента в листьях опытных растений по сравнению с контрольными. Затем наблюдается скачкообразные изменения содержания хлорофилла В – 15–27-е сут. эксперимента; на 30-е сут. количество пигмента в листьях опытных растений было значительно выше относительно контроля.

При изучении характера действия ионов Pb^{2+} на содержание каротиноидов в листьях тополя установлено, что на третьи и

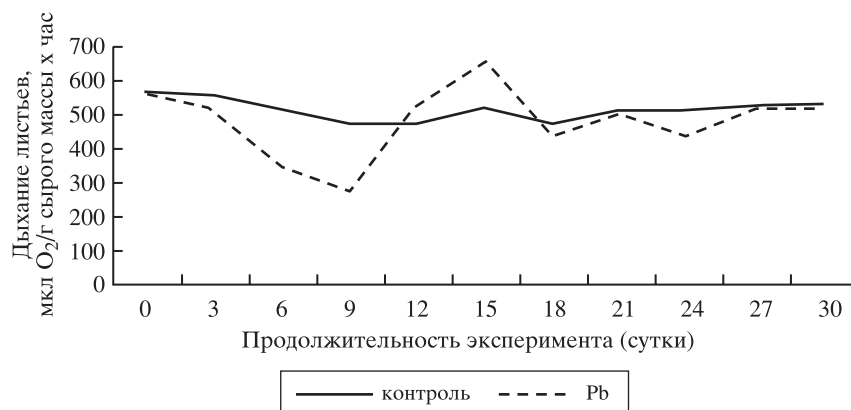


Рис. 66. Изменение интенсивности дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) после однократной обработки растений сублетальными концентрациями ионов Pb^{2+} (песчаная культура)

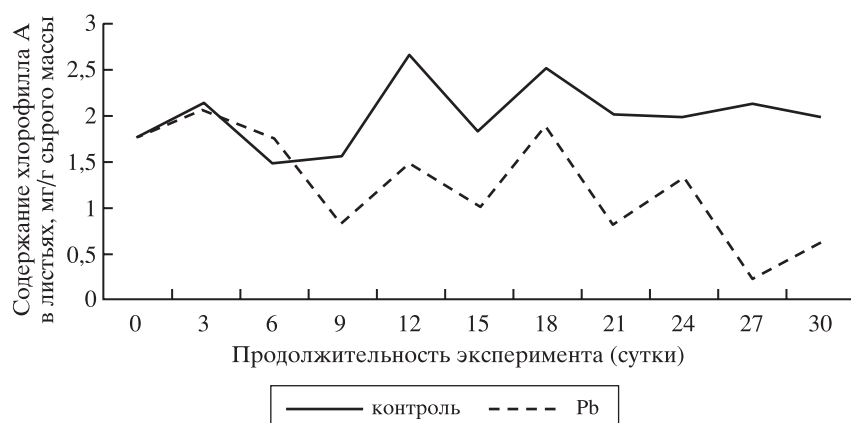


Рис. 67. Изменения содержания хлорофилла А в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Pb^{2+} (песчаная культура)

6-е сут. происходит постоянное снижение, затем увеличение – 9–15-е сут. эксперимента; на 18–24-е сут. отмечается снижение содержания каротиноидов в листьях опытных растений. Установлено, что на 30-е сут. эксперимента содержание каротиноидов в листьях контрольных растений ниже по сравнению с опытными образцами.

Содержание суммы пигментов в листьях тополя бальзамического после однократного действия сублетальных концентраций

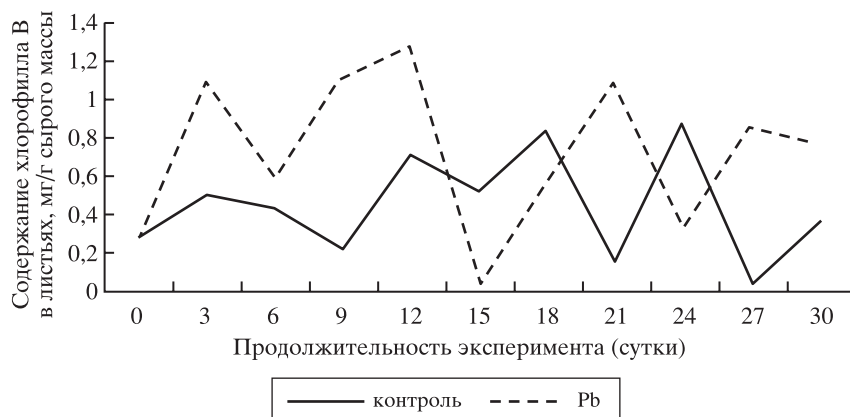


Рис. 68. Изменения содержания хлорофилла В в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Pb^{2+} (песчаная культура)

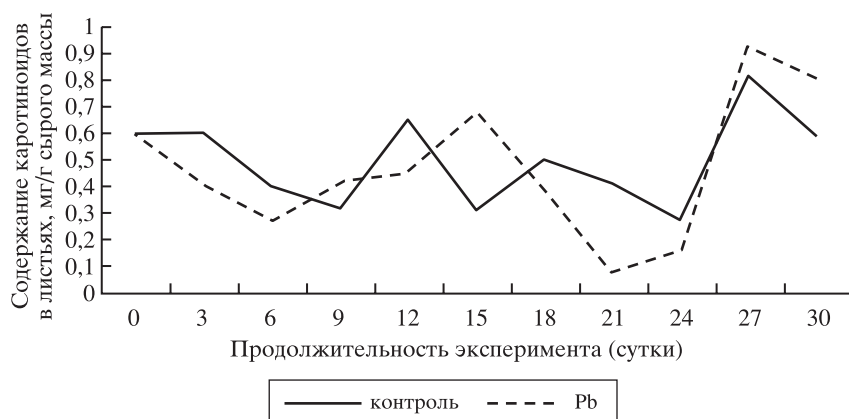


Рис. 69. Изменения содержания каротиноидов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Pb^{2+} (песчаная культура)

Pb^{2+} повышается на 3–9-е сут., снижается на 12–30-е сут. эксперимента по сравнению с контролем.

При хроническом загрязнении окружающей среды Pb^{2+} наблюдается двукратное уменьшение количества хлорофилла А и четырехкратное уменьшение количества хлорофилла В в листьях тополей по сравнению с контролем. Содержание каротиноидов в листьях опытных растений также меньше по сравнению с

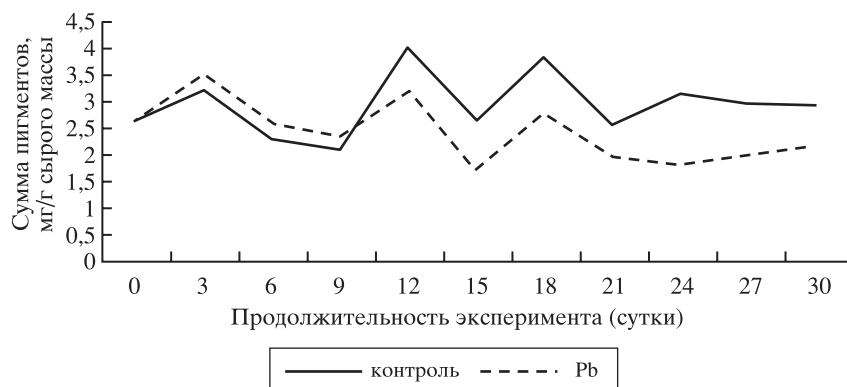


Рис. 70. Изменения содержания суммы пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии на растения Pb^{2+} (песчаная культура)

контролем, в среднем, на 20%. Суммарное содержание пигментов в листьях опытных растений не превышает 50% соответствующего показателя для контрольных растений.

Железо

Характеристика элемента. Химический элемент VIII группы. Атомный номер 26. Атомная масса 55,847. Элемент в природе состоит из четырех стабильных изотопов – ^{54}Fe (5,84%), ^{56}Fe (91,68%), ^{57}Fe (2,17%) и ^{58}Fe (0,31%). Железо представляет собой серебристо-белый металл. Применяется практически во всех областях техники [Вредные ..., 1988].

Содержание в природе. По распространенности в литосфере (4,65% по массе) железо занимает второе место среди металлов. Оно постоянно мигрирует в земной коре, образуя около 300 минералов – окислы, сульфиды, силикаты, карбонаты, титанаты, фосфаты и др. Железо принимает активное участие в магматических, гидротермальных и гипергенных процессах, с которыми, в свою очередь, связано образование различных типов месторождений. Железо является металлом земных глубин, который накапливается на ранних этапах кристаллизации магмы, в ультраосновных (9,85%) и основных (8,56%) породах (в гранитах его не более 3%). В биосфере железо накапливается во многих морских и континентальных осадках, образуя осадочные руды [Алексеев, 1987; Вредные ..., 1988].

Важнейшую роль в геохимии железа играют окислительно-восстановительные процессы – переход двухвалентного железа

и в трехвалентное, и обратно. В биосфере при наличии органических веществ Fe^{3+} восстанавливается до Fe^{2+} и легко мигрирует, а при встрече с кислородом воздуха Fe^{2+} окисляется с образованием гидроокисей. Широко распространенные соединения Fe^{3+} имеют красный, желтый и бурый цвет. Этим и определяется окраска осадочных горных пород и их наименование, например, “красноцветная формация” (красные и бурые глины и суглинки, желтые пески и т.д.) [Петрунина, 1974; Вредные ..., 1988].

Роль железа в жизни человека, животных и растений

Железо является обязательным компонентом всех живых организмов (содержание, в среднем, около 0,02%) и необходимо для кислородного обмена и окислительных процессов. Существуют организмы-концентраторы железа, например, железобактерии, способные накапливать до 17–20%. Почти все железо в организмах животных и растений связано с белками. Недостаток железа вызывает задержку роста и явление хлороза у растений, обусловленное снижением синтеза хлорофилла. Негативное влияние на растения оказывает и избыток железа, что проявляется, например, в стерильности цветков риса или появлении хлорозов. В организм животных и человека железо поступает с пищей – наиболее богаты им печень, мясо, яйца, бобовые, хлеб, крупы, шпинат, свекла. В норме человек получает с рационом 60–11 мг железа, что значительно превышает суточную потребность (см. ниже). Всасывание железа происходит в верхнем отделе тонкого кишечника, откуда оно, в форме связанной с белками, поступает в кровь и разносится к различным органам и тканям, где депонируется в виде особого комплекса – ферритина. Основное депо железа – печень и селезенка. За счет ферритина происходит синтез всех железосодержащих соединений организма: в костном мозге синтезируется дыхательный пигмент гемоглобин, в мышцах – миоглобин, в различных тканях – цитохромы и другие железосодержащие ферменты. Выделяется железо из организма, в основном, через стенку толстого кишечника (у человека 6–10 мг в сутки) и в незначительной степени почками. Потребность организма в железе меняется с возрастом и физическим состоянием. На 1 кг веса детям необходимо 0,6, взрослым – 0,1 и беременным – 0,3 мг железа в сутки. У животных потребность в железе на 1 кг сухого вещества рациона в среднем составляет 50–200 мг [Вредные ..., 1988].

Таблица 19

**Содержание железа (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Zn
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	2140
	Внешний слой коры	2320
	Внутренний слой коры	2070
	Древесина	2410
	Корень	6470
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	3410
	Внешний слой коры	3550
	Внутренний слой коры	4270
	Древесина	3550
	Корень	2740
Контроль оз. Узункуль	Листья	3840
	Кора	1570
	Древесина	1210
	Корень	5190
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	2870
	Кора	4270
	Древесина	2800
	Корень	7100
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	4790
	Внешний слой коры	3190
	Внутренний слой коры	2510
	Древесина	6860
	Корень	6640
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	3680
	Кора	7720
	Древесина	6140
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	1630
	Кора	3330
	Корень	1710

Аккумуляция железа в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

Особенности накопления железа исследовали на растениях березы бородавчатой и сосны обыкновенной, произрастающих на отвалах различных месторождений. Установлено, что содержание железа в растениях исчисляется тысячами ppm, причем в многолетних частях растений аккумулируется большая часть металла. Органами-концентраторами железа можно назвать корни и кору (табл. 19). Следует отметить, что в отвальных грунтах со

Таблица 20

**Содержание железа (ppm) в почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Fe
Карьер Красовского хромитового месторождения	246000
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	175000
Контроль оз. Узункуль	168000

держание железа значительно больше по сравнению с контролем, что объясняет повышенное содержание данного металла в растениях, произрастающих на отвальных почвогрунтах (табл. 19).

СТРОНЦИЙ

Характеристика элемента. Элемент II группы. Атомный номер 38. Атомная масса 87,62. Элемент состоит из смеси четырех стабильных изотопов ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr и ^{88}Sr ; наиболее распространен ^{88}Sr – 82,56%. Стронций представляет собой серебристо-белый металл [Алексеев, 1987; Бандман и др., 1988; Вредные ..., 1988].

Содержание в природе. Среднее содержание стронция в земной коре (кларк) – $3,4 \cdot 10^{-2}\%$ по массе, в геохимических процессах является спутником кальция. Известно более 30 минералов стронция; однако важнейшими из них являются – целестин SrSO_4 и стронцианит SrCO_3 . В магматических породах стронций находится преимущественно в рассеянном виде и входит в виде изоморфной примеси в кристаллическую решетку кальциевых, калиевых и бариевых минералов. В биосфере стронций накапливается в карбонатных породах и особенно в осадках соленых озер и

лагун – месторождения целестина [Алексеев, 1987; Бандман и др., 1988; Вредные ..., 1988].

Роль стронция в жизни человека, животных и растений

Стронций является составной частью микроорганизмов, растений и животных. У морских радиолярий (акантарий) скелет состоит из сульфата стронция – целестина; морские водоросли содержат 26–140 мг стронция на 100 г сухого вещества, наземные растения – около 2,6, морские животные – 2–50, наземные животные – около 1,4, бактерии – 0,27–30. Накопление стронция различными организмами зависит не только от их вида, но и от соотношения в среде стронция с другими элементами, главным образом, с Са и Р, а также от адаптации организмов к определенной геохимической среде. Животные получают Sr с пищей и водой. Он всасывается в тонком, а выделяется, в основном, толстым кишечником. Главное депо в организме – костная ткань, в золе которой содержится до 0,02% стронция (в других тканях – около 0,0005%). Избыток Sr в рационе млекопитающих вызывает “стронциевый” рахит. У животных, обитающих на почвах со значительным количеством целестина, наблюдается повышенное содержание стронция в организме, что приводит к ломкости костей, рахиту и другим заболеваниям. В биогеохимических провинциях, которые богаты стронцием (Центральная и Восточная Азия, Северная Европа), достаточно часто встречается так называемая уроновская болезнь [Вредные ..., 1988].

Аккумуляция стронция в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

Стронций аккумулируется в различных органах лиственницы Сукачева (табл. 20). Отмечено, что наибольшее количество стронция накапливается в трехлетних побегах (113 ppm), наименьшее – в коре (46 ppm). Следует отметить, что в молодых развивающихся частях растения (одно и двухлетних побегах) содержание стронция достаточно велико – более 80 ppm; в подземной части растений содержание стронция не превышает 70 ppm.

Стронций накапливается во всех частях березы бородавчатой (табл. 21). Однако наибольшее его содержание отмечается в корневой системе (93 ppm) и двухлетних побегах (80 ppm), наименьшее – в однолетних побегах (58 ppm) и коре (52 ppm). Между содержанием стронция в листьях и трехлетних побегах достоверных различий не обнаружено. Таким образом, распределение

Таблица 21

Содержание стронция (ppm) в различных органах березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на отвалах бурогоугольного месторождения (Башкирское Предуралье)

Вид		Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Ассимиляционные органы	1-й год	66±8,7	—	2,8±0,3
	2-й год	—	—	12±1,5
	3-й год	—	—	20±3,7
Побеги	1-й год	58±3,1	80±9,2	8,9±0,9
	2-й год	80±4,6	86±8,7	12±1,2
	3-й год	67±2,9	113±26,1	22±2,4
Кора (на высоте 1,3м)		52±3,5	46±5,9	9,5±1,0
Корни (на глубине 0–20 см)		93±6,2	65±7,3	22±2,8
Грунт под насаждением		86±21,9	83±23,7	55±14,2
Грунт необлесенного участка			181±49,0	

стронция в растениях березы бородавчатой можно характеризовать как равномерное. Суммарное количество металла в надземной части выше чем в подземной, что является основанием для того, чтобы сделать предположение о высокой проникающей способности стронция в растительный организм (в данном случае – береза бородавчатая).

Установлено, что в органах сосны обыкновенной стронций накапливается в значительных количествах. Следует отметить, что стронций в максимальной степени накапливается в корневой системе, трехлетних побегах и трехлетней хвое – 22, 22 и 20 ppm, соответственно, а в наименьшей степени – в однолетней хвое (2,8 ppm). Отмечено, что в более молодых органах растения накапливается меньшее количество стронция (табл. 21).

В табл. 20 представлены данные о количественном содержании стронция в органах древесных растений, произрастающих на отвалах полиметаллических месторождений.

Содержание стронция в хвое сосны на отвалах полиметаллических месторождений ниже по сравнению с древесиной, корой и корневой системой. При этом растения березы основную массу стронция концентрируют в корневой системе и листьях. Такая за-

Таблица 22

Содержание стронция (ppm) в вегетативных органах древесных растений на отвалах полиметаллических месторождений

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Zn
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	63
	Внешний слой коры	7,4
	Внутренний слой коры	12
	Древесина	3,2
	Корень	23
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	44
	Внешний слой коры	47
	Внутренний слой коры	198
	Древесина	29
	Корень	45
Контроль оз. Узункуль	Листья	29
	Кора	12
	Древесина	5,2
	Корень	42
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	99
	Кора	25
	Древесина	8,5
	Корень	117
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Листья	115
	Внешний слой коры	70
	Внутренний слой коры	106
	Древесина	50
	Корень	104
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	25
	Кора	39
	Древесина	67
Отвалы Мало-Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	40
	Кора	54
	Корень	14

Таблица 23

**Содержание стронция (ppm) в почвогрунтах на отвалах
полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Sr
Карьер Красовского хромитового месторождения	83
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	239
Контроль оз. Узункуль	149

кономерность обнаруживается для березы как в контрольных условиях, так и в условиях техногенеза.

Фоновое содержание стронция в почвогрунтах занимает промежуточное положение между содержанием данного элемента в отвальных грунтах марганцевого месторождения и карьера хромитового месторождения (табл. 23).

КАДМИЙ

Характеристика элемента. Элемент II группы. Атомный номер 48. Атомная масса 112,4. Элемент состоит из восьми стабильных изотопов с массовыми числами: 106 (1,215%), 108 (0,875%), 110 (12,39%), 111 (12,75%), 112 (24,07%), 113 (12,26%), 114 (26,86%) и 116 (7,58%). Кадмий представляет собой белый, блестящий, тяжелый, мягкий, тягучий металл [Бандман и др., 1988; Вредные ..., 1988].

Содержание в природе. Кадмий является редким и рассеянным элементом с кларком литосферы $1,3 \cdot 10^{-5}\%$ по массе. Для кадмия характерны миграция в горячих подземных водах и концентрация в гидротермальных месторождениях. Концентрируется кадмий в морских осадочных породах – сланцах, в песчаниках, у которых он также связан с цинком и другими халькофильными элементами. В биосфере известны три очень редких самостоятельных минерала кадмия – карбонат CdCO_3 (отавит), окись CdO (монтепонит) и селенид CdSe [Вредные..., 1988].

Роль кадмия в жизни человека, животных и растений

Содержание кадмия в растениях составляет $10^{-4}\%$ (на сухое вещество), у некоторых животных (губок, кишечнорастворимых, червей, иглокожих и оболочников) – $4 \cdot 10^{-5}$ – $3 \cdot 10^{-3}\%$ сухого вещества. Cd обнаружен в организме всех позвоночных животных, максимальное его количество аккумулируется в печени. Извест-

но, что кадмий влияет на углеводный обмен, на синтез в печени гиппуриновой кислоты, на активность некоторых ферментов [Ильин, 1981,1991; Алексеев, 1987; Нестерова, 1989; Зимаков, Захарова, 1990; Тяжелые..., 1994; Каталог..., 1995; Bingham et al., 1975; Jarvis et al., 1976; Kuboi et al., 1986; Kuboi, 1990].

Аккумуляция кадмия в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

На отвалах бурогоугольного месторождения созданы защитные лесные насаждения. Показано, что суммарное содержание кадмия в надземной части лиственницы Сукачева почти в два раза больше, чем в подземной части. Наибольшее количество кадмия содержится в двухлетних побегах (5,8 ppm) и корневой системе (4,1 ppm), а наименьшее – в однолетних побегах (0,94 ppm). В листьях и однолетних побегах березы содержание кадмия минимальное. Наибольшее количество кадмия накапливается в более старых частях березы бородавчатой – в двухлетних побегах (1,1 ppm). Содержание кадмия в корневой системе, коре и трехлетних побегах различается незначительно и не превышает 0,8 ppm (табл. 24).

Анализируя данные о количественном содержании кадмия в различных органах сосны обыкновенной, отмечено, что накопление этого элемента происходит в корневой системе (1 ppm), трехлетних побегах (0,84 ppm), однолетних побегах (0,4 ppm) и

Таблица 24

Содержание кадмия (ppm) в различных органах березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на отвалах бурогоугольного месторождения (Башкирское Предуралье)

Вид		Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Ассимиляционные органы	1-й год	0,11±0,03	–	следы
	2-й год	–	–	следы
	3-й год	–	–	следы
Побеги	1-й год	0,37±0,05	0,94±0,1	0,4±0,07
	2-й год	1,1±0,12	5,8±1,4	следы
	3-й год	0,75±0,08	1,6±0,2	0,84±0,1
Кора (на высоте 1,3 м)		0,78±0,07	2,2±0,3	0,14±0,01
Корни (на глубине 0–20 см)		0,6±0,09	4,1±0,7	1±0,16
Грунт под насаждением		0,55±0,16	0,15±0,04	следы
Грунт необлесенного участка			5,4±1,1	

Таблица 25

**Содержание кадмия (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Cd
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	0,19
	Внешний слой коры	0,2
	Внутренний слой коры	0,16
	Древесина	5
	Корень	0,23
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	0,64
	Внешний слой коры	1,5
	Внутренний слой коры	0,64
	Древесина	2,6
	Корень	1,7
Контроль оз. Узункуль	Листья	0,34
	Кора	4
	Древесина	2,9
	Корень	4,7
Отвалы Южно–Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	0,42
	Кора	3,4
	Древесина	3,7
	Корень	2,1
Отвалы Мало–Каранского золоторудного месторождения	Листья	0,14
	Внешний слой коры	1,6
	Внутренний слой коры	0,39
	Древесина	13
	Корень	0,2
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно–Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	0,97
	Кора	0,35
	Древесина	3
Отвалы Мало–Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	0,42
	Кора	1,8
	Корень	0,24

Таблица 26

**Содержание кадмия (ppm) в почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений**

Название местоположения	Cd
Карьер Красовского хромитового месторождения	0,13
Отвалы Южно-Файзуллинского марганцевого месторождения	1,1
Контроль оз. Узункуль	0,14

коре (0,14 ppm). В хвое и двухлетних побегах кадмий содержится лишь в следовых количествах (табл.).

Наибольшее содержание кадмия отмечается в древесине березы бородавчатой и сосны обыкновенной, произрастающих на отвалах полиметаллических месторождений. При этом в контрольных условиях распределение металла в органах березы бородавчатой выглядит следующим образом: корни>кора>древесина>листья (табл. 25). Суммарное содержание кадмия в контрольных растениях на порядок выше по сравнению с опытом, при том, что в грунтах марганцевого месторождения содержание этого элемента почти в 9 раз больше фонового (табл. 25).

Установлено, что закономерность пространственного распространения кадмия в тополях аналогична распределению меди и цинка (рис. 71). Отмечено, что у сосны и березы содержание кадмия возрастает от листьев (хвои) к ветвям и достигает наибольших величин в корнях (рис. 72, 73). У тополя наибольшее количество металла содержится в ветвях, наименьшее – в листьях, корни занимают промежуточное положение (рис. 71). В целом, для условий Башкирского Зауралья среднее содержания кадмия составляет для корней – 0,17 ppm, ветвей – 0,16, листьев (хвои) – 0,11.

Результаты дисперсионного анализа показали, что у тополя, сосны и березы наблюдается существенная разница между содержанием кадмия в листьях (хвое), ветвях и корнях.

Также установлено, что у изученных древесных пород наблюдается существенная разница между содержанием металла в листьях (хвое) и ветвях, листьях (хвое) и корнях, ветвях и корнях. В отличие от меди и цинка, по содержанию кадмия исследованные древесные породы существенно различаются между собой. Значимые различия выявлены между количеством металла в хвое сосны и листьях тополя, а также в листьях тополя и березы. Существенные различия наблюдаются между количеством кадмия в корнях сосны и березы, однако, для корней сосны и тополя и ветвей тополя, сосны, березы разница незначима.

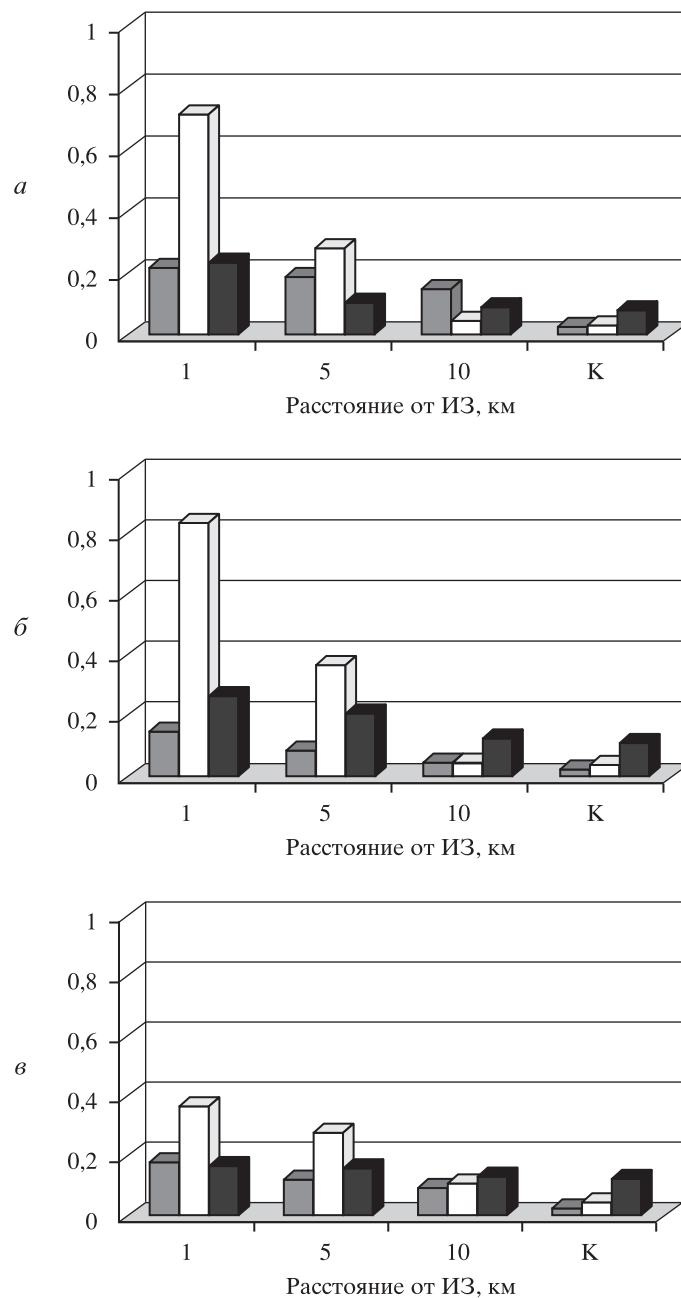


Рис. 71. Содержание кадмия в тополе черном (*Populus nigra* L.) на черноземах Башкирского Зауралья

А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

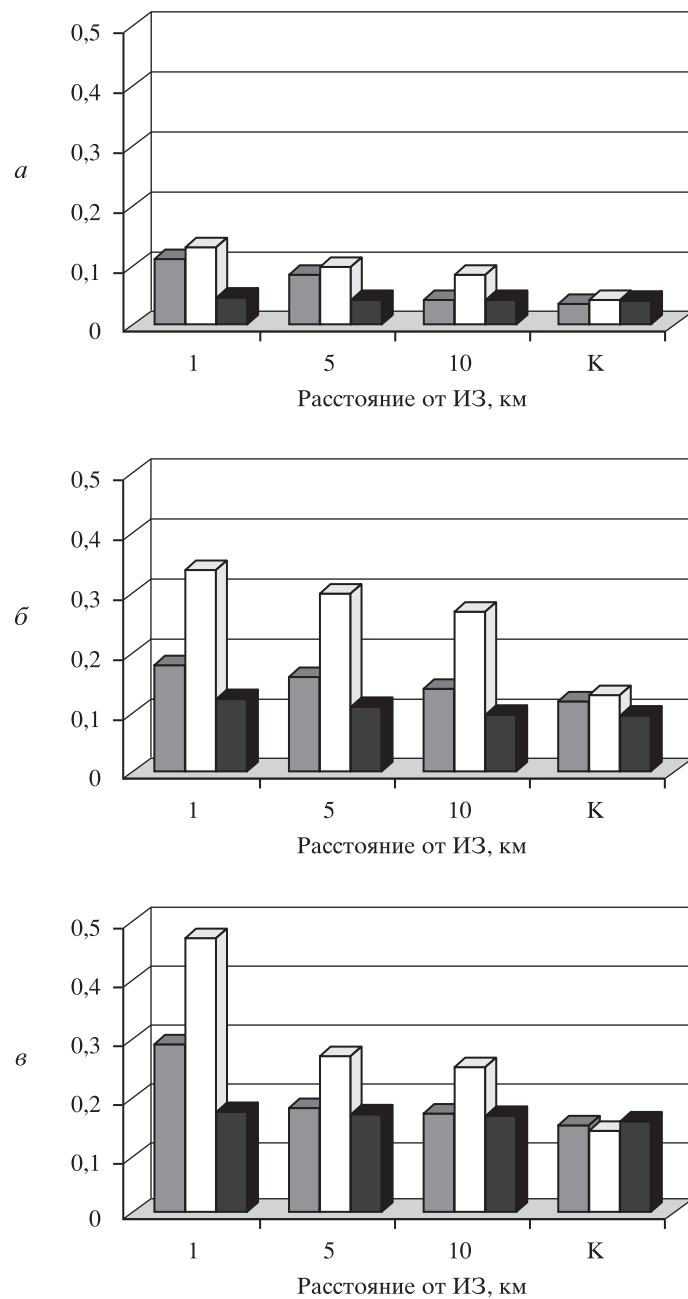


Рис. 72. Содержание кадмия (ppm) в сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на черноземах Башкирского Зауралья
 А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧВ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

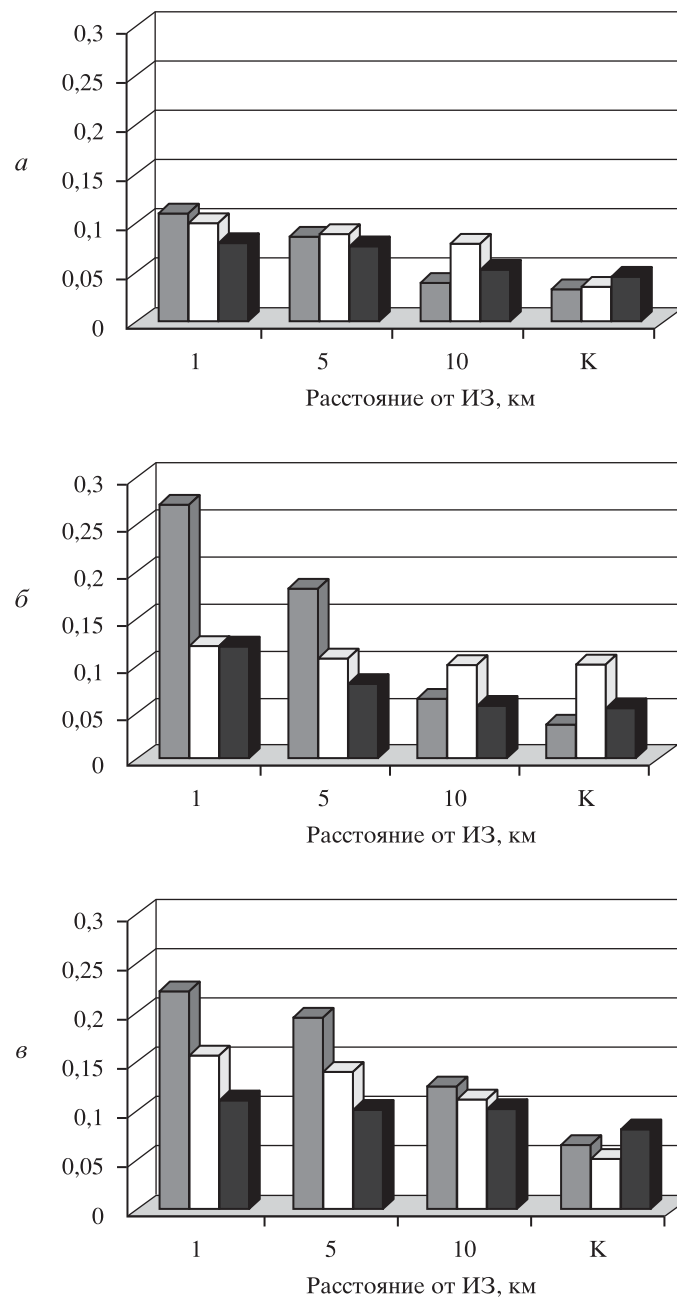


Рис. 73. Содержание кадмия (ppm) в березе бородавчатой (*Betula pendula* Roth.) на черноземах Башкирского Зауралья

А – листья, Б – ветви, В – корни; □ – ЧБ, □ – ЧО, □ – ЧЮ; К – условный контроль; ИЗ – источник загрязнения

Определение интенсивности накопления кадмия древесными породами показало, что наибольшая аккумулярующая способность характерна для тополя. Это подтверждается фактическими данными, полученными в радиусе 10 км от ИЗ на пробных площадках с черноземами выщелоченными и обыкновенными. Так, на черноземе обыкновенном по мере приближения к ГОК величина K_a у листьев тополя изменяется от 1,5 до 21,2, у ветвей – от 1,14 до 19,1, у корней – от 2,4 до 8.

Интенсивная аккумуляция кадмия установлена для ветвей березы, произрастающей на черноземе выщелоченном: коэффициент аккумуляции варьирует в пределах от 1,7 до 7,5. У сосны интенсивность поглощения металла ниже, чем у тополя и березы (K_a составляет 2,3–2,5).

Наибольшие количества кадмия обнаружены в древесных породах, произрастающих на черноземе обыкновенном, затем в порядке убывания следуют породы на выщелоченном и южном черноземах.

Установлено, что на черноземе выщелоченном наибольшие количества металла содержатся в сосне, на обыкновенном и южном подтипах – в тополе. В березе содержится меньшее количество кадмия. Следует отметить, что больше всего металла депонировано в корнях деревьев, далее в порядке убывания следуют ветви и листья (хвоя). Если же исходить из величины K_a (иногда в литературе данный коэффициент называют *индексом нагрузки* или *индексом загрязнения*), то можно констатировать, что рассматриваемые органы древесных растений аккумулируют кадмий в целом на одинаковом уровне. Так, на черноземе южном у листьев (хвои), ветвей и корней тополя, сосны, березы K_a изменяется в довольно узких пределах – от 1,1 до 1,7.

Таким образом, наибольшее содержание кадмия выявлено в корнях древесных пород, наименьшее – в листьях (хвое). Ветви занимают промежуточное положение. По количественному содержанию кадмия древесные породы образуют ряд: тополь черный > сосна обыкновенная > береза бородавчатая. По интенсивности поглощения кадмия исследованные породы располагаются в следующем порядке: тополь черный > береза бородавчатая > сосна обыкновенная.

Кадмий является химическим аналогом, антагонистом и спутником цинка. Он присутствует в колчеданных месторождениях, хотя и содержится не в столь значительных количествах как медь или цинк. Результаты проведенных исследований содержания кадмия в почвенном покрове БЗ показали, что его накопление также обусловлено расстоянием от ИЗ. По сравнению с местным контролем, приравненным к фоновому, все исследованные подтипы черноземов содержат данный металл в пределах природной флуктуации

или же имеют слабое загрязнение по его валовым формам. По количественному накоплению валового кадмия лидирует чернозем выщелоченный – 0,22–0,58 мг/кг воздушно-сухой почвы, далее следуют обыкновенный (0,18–0,54 мг/кг) и южный (0,18–0,48 мг/кг) подтипы. Следует отметить высокую миграционную способность данного металла, о чем свидетельствует его более равномерное распределение по почвенному профилю. В отличие от остальных изученных ТМ, кадмий характеризуется слабой аккумуляцией в пахотном горизонте. По содержанию кислоторастворимых форм кадмия пахотный слой черноземов выщелоченных и обыкновенных имеет умеренную интенсивность загрязнения [Добровольский, 1999], у чернозема южного – сильную. На пробных площадках с черноземом южным в слое 0–30 см отмечена повышенная доля подвижного кадмия, что составляет 71,4–90,9% от его валового содержания. Как отмечалось выше, среди всех изученных почв, выщелоченный чернозем занимает ведущие позиции по аккумуляции валового кадмия, однако по содержанию активных форм данного металла он уступает обыкновенному и южному подтипам.

При сопоставлении содержания в почве валовых форм металла с ПДК, составляющей 1,5 мг/кг, ни на одной из площадок не отмечено превышения данного показателя. Содержание подвижных форм кадмия в черноземе выщелоченном также не превышает ПДК для активных форм металла, которая равняется 0,24 мг/кг. Лишь в непосредственной близости от ИЗ в слое 0–40 см черноземов обыкновенного и южного концентрация подвижного кадмия составляет, соответственно, 1,6 ПДК (вторая степень химической деградации почв по “Система оценки..., 1992”) и 4,5 ПДК (четвертая степень).

РГФ для валовых форм кадмия составляет 0,15 мг/кг воздушно-сухой почвы и для подвижных форм 0,01 мг/кг. Исследования показали, что на всех участках (включая и площадки условного контроля) в почвах наблюдается превышение над РГФ.

Фоновое содержание кадмия для черноземов составляет 0,24 мг/кг [Яковлев и др., 1993]. Почвы всех пробных площадок накапливают металл на порядок выше фона. На условном контроле с черноземами выщелоченными (начиная со слоя 20–30 см и глубже) и обыкновенными (со слоя 30–40 см) концентрация кадмия также превосходит данный показатель, что связано с обогащенностью металлом почвообразующих пород.

Высокое содержание подвижных форм металла в черноземе южном определяется почвенно-грунтовыми условиями и характером материнских пород. По суммарному накоплению кадмия зональные подтипы черноземов БЗ образуют следующий ряд: выщелоченные > обыкновенные > южные.

НИКЕЛЬ

Характеристика элемента. Ni – элемент первой триады VIII группы периодической системы, атомный номер – 28, атомная масса – 58,7. Серебристо-белый металл, ковкий и пластичный. Природный никель состоит из смеси пяти стабильных изотопов: ^{58}Ni (67,76%), ^{60}Ni (26,16%), ^{61}Ni (1,25%), ^{63}Ni (3,66%), ^{64}Ni (1,16%) [Вредные..., 1988].

Содержание в природе. Ni – элемент земных глубин (в ультраосновных породах мантии его 0,2% по массе). В земной коре содержание Ni – $5,8 \cdot 10^{-3}\%$, он является спутником железа и марганца. Минералов Ni известно более 50, большинство из них образовалось при высоких температурах и давлениях, при застывании магмы или горячих водных растворов. Промышленные месторождения никеля – сульфидные руды, обычно сложены минералами никеля и меди. На поверхности земли, в биосфере Ni – достаточно слабый мигрант. Его относительно мало в поверхностных водах и в живом веществе. Отмечается, что в районах, где преобладают ультраосновные породы, почва и растения обогащены никелем [Алексеев, 1987; Вредные..., 1988].

Роль никеля в жизни человека, животных и растений

Ni является необходимым микроэлементом. Среднее содержание его в растениях $5 \cdot 10^{-6}\%$ на сырое вещество, в организме наземных животных – $10^{-6}\%$, в морских – $1,6 \cdot 10^{-4}\%$. В животном организме никель обнаружен в печени, коже и эндокринных железах; накапливается в ороговевших тканях (особенно в перьях). Установлено, что никель активирует фермент аргиназу, влияет на окислительные процессы; у растений Ni принимает участие в ряде ферментативных реакций (карбоксилирование, гидролиз пептидных связей). На обогащенных никелем почвах содержание его в растениях может увеличиться в 30 раз и более, что приводит к эндемическим заболеваниям (у растений – уродливые формы, у животных – заболевания глаз, связанные с повышенным накоплением Ni в роговице: кератиты и кератоконъюнктивиты) [Алексеев, 1987; Вредные..., 1988; Каталог..., 1995; Holstead et al., 1969; Anderson et al., 1973].

Аккумуляция никеля в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения

В ходе проведения анализов по определению содержания никеля в различных органах березы бородавчатой было установлено, что в листьях и однолетних побегах никель отсутствует, со-

Таблица 27

**Содержание никеля (ppm) в различных органах березы
бородавчатой (*Betula pendula* Roth.)
и лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.),
произрастающих на отвалах буроугольного месторождения
(Башкирское Предуралье)**

Вид		Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева
Ассимиляционные органы	1-й год	следы	—
	2-й год	—	—
	3-й год	—	—
Побеги	1-й год	следы	следы
	2-й год	20±2,7	следы
	3-й год	19±1,4	19±2,7
Кора (на высоте 1,3 м)		26±2,1	следы
Корни (на глубине 0–20 см)		73±9,8	следы
Грунт под насаждением		207±62,4	253±76,3
Грунт необлесенного участка		876±216,7	

держание металла в двух- и трехлетних побегах различается незначительно, а наибольшее количество никеля накапливается в корневой системе березы бородавчатой (73 ppm) и коре (26 ppm). Защитные механизмы березы обеспечивают депонирование металла в более старых органах растения, тем самым, предотвращая попадания никеля в молодые развивающиеся органы и ткани. Показано, что никель аккумулируется в трехлетних побегах (19 ppm) лиственницы Сукачева при этом в корнях, коре, одно и двухлетних побегах лиственницы никель обнаруживается лишь в следовых количествах (табл. 27).

В органах сосны обыкновенной, произрастающих на отвалах буроугольного месторождения никель не обнаруживается, а почвогрунтах под насаждениями содержание этого металла достаточно высокое – до $231 \pm 63,8$ ppm.

Береза бородавчатая не аккумулирует никель при произрастании на отвалах хромитового месторождения (табл. 28). Однако достаточно высокое содержание никеля отмечается в березе, произрастающих в карьере хромитового месторождения – от 43 ppm в корневой системе до 6,1 ppm во внутреннем слое коры. Отмечается, что в березе бородавчатой, произрастающей как на отвалах марганцевого и золоторудного месторождения, как и в контрольных условиях, содержание никеля не превышает 18 ppm.

Таблица 28

**Содержание никеля (ppm) в вегетативных органах древесных растений
на отвалах полиметаллических месторождений**

Местопроизрастания растений	Вегетативные органы	Ni
<i>Betula pendula</i> Roth. (береза бородавчатая)		
Карьер Красовского хромитового месторождения	Листья	16
	Внешний слой коры	11
	Внутренний слой коры	6,1
	Древесина	19
	Корень	43
Отвалы Красовского хромитового месторождения	Листья	0
	Внешний слой коры	0
	Внутренний слой коры	0
	Древесина	0
	Корень	0
Контроль оз. Узункуль	Листья	15
	Кора	6,4
	Древесина	4,8
	Корень	18
Отвалы Южно–Файзуллинского марганцевого месторождения	Листья	4,5
	Кора	17
	Древесина	14
	Корень	16
Отвалы Мало–Каранского золоторудного месторождения	Листья	0
	Внешний слой коры	0
	Внутренний слой коры	0
	Древесина	0
	Корень	0
<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная)		
Отвалы Южно–Файзуллинского марганцевого месторождения	Хвоя	11
	Кора	4,3
	Древесина	14
Отвалы Мало–Каранского золоторудного месторождения	Хвоя	0
	Кора	0
	Корень	0

Таблица 29

**Содержание никеля в (ppm) почвогрунтах
на отвалах полиметаллических месторождений.**

Название местоположения	Ni
Карьер Красовского хромитового месторождения	937
Отвалы Южно–Файзуллинского марганцевого месторождения	0
Контроль оз. Узункуль	0

Установлено, что в сосне обыкновенной также не происходит аккумуляции никеля при произрастании на отвалах золоторудного месторождения. Содержание никеля в органах сосны, произрастающих на отвалах марганцевого месторождения, изменяется в пределах от 4,3 до 14 ppm в коре и древесине соответственно.

В результате аналитических работ установлено, что в контрольных образцах и образцах грунта с отвалов марганцевого месторождения никель отсутствует. Но его содержание в грунтах отвалов хромитового месторождения достигает 937 ppm (табл. 29).

СОСТОЯНИЕ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ ДРЕВЕСНЫМИ РАСТЕНИЯМИ В ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ

Способность древесных растений аккумулировать в своих органах часть металлов-загрязнителей подтверждает тезис о возможности использования растительности в качестве барьера на пути распространения токсичных компонентов в окружающей среде. Получены данные, характеризующие особенности распределения некоторых металлов в различных органах древесных растений, произрастающих на отвалах предприятий горнодобывающей промышленности в условиях загрязнения окружающей среды полиметаллического типа.

Установлено, что в корневой системе березы бородавчатой, в коре и древесине сосны обыкновенной накапливается наибольшее количество бария. Марганец аккумулируется преимущественно в листьях березы, трехлетних побегах лиственницы Сукачева и трехлетней хвое сосны. Максимальное количество меди обнаружено в трехлетних побегах березы, коре сосны и корнях тополя черного; в то время как что в растениях лиственницы присутствуют лишь следы данного металла. Цинк, в основном, накапливается в двух и трехлетних побегах березы и лиственницы, соответственно, в растениях сосны цинк обнаруживается в следовых количествах. Основная масса свинца, железа и стронция концентрируется в корневой системе древесных растений. Исключение в данном случае составляют следующие породы: в растениях сосны железо не обнаруживается, а стронция чуть больше накапливается в трехлетних побегах лиственницы. Кадмий аккумулируется в побегах березы, лиственницы и тополя черного, а также в корнях сосны. Содержание никеля в корневой системе березы, а также побегах сосны и лиственницы максимально по сравнению с другими органами этих растений.

Анализ особенностей распределения металлов позволяет констатировать, что содержание железа в древесных растениях в абсолютном и относительном исчислении максимально и составляет тысячи ppm. В то же время абсолютное и относительное со-

держание кадмия не превышает 6 ppm. Показано, что корневая система и побеги являются основными местами депонирования металлов, в то время как в коре и ассимиляционных органах происходит наименьшее концентрирование металлов.

Среди исследуемых древесных пород наибольшей аккумулярующей способностью обладает береза бородавчатая, наименьшей – лиственница Сукачева, промежуточное положение занимает сосна обыкновенная. Однако тот факт, что береза бородавчатая концентрирует железо, барий, медь, стронций и никель, лиственница Сукачева – марганец, цинк, свинец и кадмий, а сосна обыкновенная аккумулирует достаточно высокое среднесуммарное количество металлов, свидетельствует о целесообразности создания многовидовых искусственных фитоценозов с целью максимального извлечения из биогеохимического круговорота техногенных элементов.

ОСТАЛЬНОЕ ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРЕВЬЕВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Определение относительного жизненного состояния (ОЖС) древостоев позволяет установить причины тех или иных повреждений древостоев, оценить устойчивость отдельных деревьев и насаждения в целом к действию природных и техногенных факторов среды.

Установлено, что ОЖС насаждений березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на отвалах предприятий горнодобывающей промышленности в условиях полиметаллического типа загрязнения окружающей среды характеризуется как “ослабленное”. Однако причины, по которым насаждения вышеуказанных пород были отнесены к категории “ослабленных” в значительной степени различаются.

Береза бородавчатая (*Betula pendula* Roth.) и тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.). Среди исследуемых пород ОЖС насаждений березы и тополя наибольшее – около 75%, таким образом, эти насаждения приближаются по своему состоянию к “здоровым”. При достаточно высокой густоте кроны (до 80%) и небольшому количеству мертвых сучьев (до 20%) отмечаются повреждения листового аппарата растений. Повреждения листьев проявляются в виде хлорозных и некротических пятен, усыхании отдельных листьев или их скручивании. Следует отметить, что на листьях нередко обнаруживались энтомоповреждения.

Лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.). ОЖС насаждений лиственницы составило 55%. При этом наблюдалось сильное повреждение ассимиляционного аппарата деревьев – значительная часть хвои опадает (т.е. наблюдается преждевременный опад), а та часть хвои, которая остается, покрыта большими по площади (до 80% от площади хвои) хлорозными и некротическими пятнами. Густота кроны при сильнейшем поражении хвои невысокая и, как правило, не превышает 50%. Однако мертвых сучьев на стволах деревьев небольшое количество (до 15%), что свидетельствует о хорошей очищаемости стволов.

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Насаждения сосны отнесены к категории “ослабленных” – ОЖС составило 67%. Оценивая основные параметры насаждения, установлено, что густота кроны деревьев составляет, в среднем, 70%, а повреждения хвои незначительны – до 20% (преобладающим повреждением является наличие хлорозных пятен). Следует отметить, что в насаждении встречаются суховершинные деревья и деревья, на стволах которых имеются морозобойные трещины. Количество мертвых сучьев на стволах достаточно высокое – до 40%.

ПРОДУКТИВНОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ МЕТАЛЛАМИ

В условиях загрязнения окружающей среды металлами отмечается значительное снижение продуктивности как отдельных деревьев, так и насаждения в целом. Наши исследования, проведенные в полевых и лабораторных условиях, показали значительные изменения в растениях основных энергетических процессов – дыхания и содержания пигментов. Отклонения от нормы функционирования жизненно важных физиологических процессов несомненно приводят к задержке роста и развития древесных растений. Работа фотосинтетического аппарата целиком зависит от соотношения пигментов в листьях и их количества, а энергия, высвобождающаяся при дыхании необходима для увеличения биомассы растений.

Следствием глубинных нарушений, происходящих в растениях, является торможение роста ассимиляционных органов, получившее название явления мелколистности [Кулагин, 1985], которое, например, отмечается у тополя при избытке металлов в окружающей среде, причем специфических реакций при действии различных металлов установлено не было.

Снижению продуктивности деревьев во многом способствуют поражения техногенными эксгалатами ассимиляционных ор-

ганов, проявляющиеся в виде образования хлорозных и некротических пятен, усыхания, скручивании листьев, а также появлении на листьях белого налета, волдырей, галлов и т.д. При действии различных металлов на древесные растения не было установлено металл-специфических повреждений. Однако выявлена направленность негативных изменений ассимиляционного аппарата – после поражения растений металлами отмечается появление хлорозных пятен, которые через некоторое время сменяются некротическими, затем происходит скручивание или усыхание листьев. Таким образом, происходит постепенное поражение и разрушение тканей листа.

Помимо поражения листьев техногенными эмиссиями отмечается их поражение листогрызущими насекомыми или домашними животными, что также приводит к значительному снижению продуктивности растений. Определенной компенсацией преждевременного опадания листьев является способность древесных растений к повторному облиствлению в течение одного вегетационного периода.

Наряду с увеличением биомассы надземных органов основой устойчивого развития и увеличения продуктивности растения является пропорциональное увеличение биомассы корневой системы. Результаты вегетационных опытов показали слабое развитие корневых систем древесных растений в условиях хронического загрязнения окружающей среды металлами.

Анализ относительного жизненного состояния лесных насаждений в техногенных ландшафтах, сведений о накоплении металлов и данных лабораторных исследований показал, что продуктивность растительного организма зависит от целого комплекса экологических факторов. Наличие суховершинности, морозобойных трещин, энтомоповреждений, бактериальных и грибковых болезней растений, являющихся постоянными спутниками ослабленных деревьев, произрастающих в условиях техногенеза, приводят к уменьшению биосферных функций древесных растений.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ КОНСЕРВАЦИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ И АДАПТАЦИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ МЕТАЛЛАМИ

Взаимодействие растений с металлами, которые находятся в атмосфере и почвогрунтах, с одной стороны обеспечивает миграцию элементов в пищевых цепях, при том, что эти элементы являются необходимыми составными компонентами растений; с другой стороны – происходит перераспределение избытков некоторых элементов, в основном техногенного происхождения, в биосфере. Способность растений концентрировать в своих органах и тканях часть промышленных эксгалатов используется человеком уже многие десятилетия. На фоне широкого распространения практики создания санитарно-защитных лесополос механизмы устойчивости растений к промышленным поллютантам и их адаптационный потенциал исследованы недостаточно. Известно, что устойчивость растений в условиях техногенеза определяется многими факторами.

Пути миграции загрязнителей окружающей среды в биосфере многочисленны. Однако они всегда проходят через уровень продуцентов. Часть поллютантов проникает в растения через листья, часть – через корневую систему. Некоторая доля аккумулируется в многолетних органах растений, а какое-то количество – в листьях. Известно, что благодаря явлению листопадности древесные растения способны избавляться от части токсичных соединений, накапливающихся в них. Этот способ, наряду с гуттацией и корневыми выделениями, является защитным механизмом, предохраняющим растительный организм от интоксикации и гибели. Следует отметить, что большая часть опавших листьев оказывается в непосредственной близости от деревьев, особенно в густых насаждениях, чем обеспечивается вторичное загрязнение верхнего слоя почвы токсикантами, содержащимися в ассимиляционных органах. Таким образом, основным путем поступления токсичных компонентов среды, в том числе и металлов, является корневая система. Несмотря на негативные последствия для растительных организмов, вызываемые первичным и вторичным загрязнением окружающей среды, биогеохимический цикл миграции токсикантов прерывается (рис. 74).

Проведенные исследования выявили видовые особенности аккумуляции различных металлов некоторыми древесными рас-

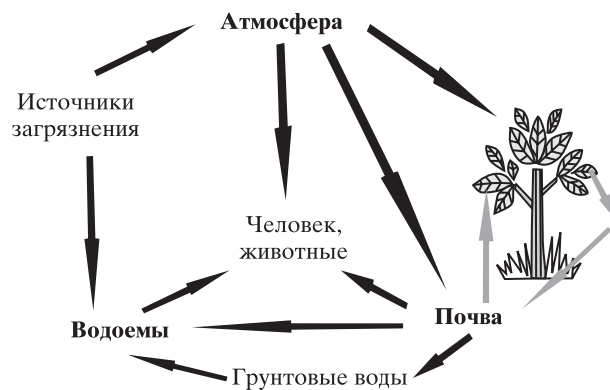


Рис. 74. Схема миграции металлов в биосфере и средостабилизирующая роль древесных растений по ограничению распространения техногенных токсикантов

* – стрелками показаны пути миграции металлов



Рис. 75. Соотношение среднеарифметических коэффициентов биоаккумуляции металлов древесными растениями в условиях техногенеза

тениями, произрастающими в условиях техногенеза (рис. 75). Так, соотношение бария, содержащегося в растении и почве, т.е. коэффициент накопления для березы бородавчатой при произрастании в карьере хромитового месторождения составил 1,3, что несколько меньше по сравнению с контролем – 2,0. Коэффициент накопления бария сосной обыкновенной при произрастании на отвалах марганцевого месторождения равен 0,4, а березы в тех же условиях – 0,9.

Количество марганца в грунтах необлесенного участка отвалов буроугольного месторождения на 30% больше по сравнению с аналогичными облесенными территориями. Наибольший коэффициент накопления марганца у сосны – 5,8, наименьший – у березы (2,0), промежуточное положение занимает лиственница Сукачева – 5,3. В условиях роста на отвалах марганцевого месторождения коэффициент накопления меди растениями березы 0,3, что несколько выше по сравнению с сосной – 0,2. При произрастании березы в карьере хромитового месторождения отмечается значительное увеличение коэффициента аккумуляции до 0,6, что выше относительно контроля – 0,4. В почвогрунтах под насаждениями березы, произрастающими на отвалах буроугольного месторождения, цинк обнаруживается лишь в следовых количествах при этом среднесуммарное содержание цинка в органах растения 451 ppm. Коэффициент накопления цинка при произрастании в идентичных условиях лиственницей составляет 7,8. В почвогрунтах отвалов хромитового месторождения и в контроле цинк обнаруживается в следовых количествах. Коэффициент аккумуляции цинка растениями березы (2,8), произрастающих на отвалах марганцевого месторождения значительно больше соответствующего показателя для сосны (1,0).

При произрастании на отвалах буроугольного месторождения отмечено увеличение коэффициента биоаккумуляции свинца в ряду береза – лиственница – сосна (1,8–2,3–3,9). В условиях произрастания на отвалах марганцевых руд наблюдается противоположная картина: 0,2 – для березы и 0,08 – для сосны. В контрольных условиях коэффициент аккумуляции для березы составляет 0,2.

Содержание железа в растениях и почвогрунтах исчисляется десятками тысяч ppm. При этом коэффициент накопления железа в растениях березы и сосны в условиях произрастания на отвалах марганцевого месторождения не различается и составляет 0,1. Незначительные различия в накоплении железа отмечены для контрольных условий и карьера хромитового месторождения, где произрастает береза. Коэффициент поглощения железа в контроле – 0,07, а в карьере – 0,06.

Коэффициенты накопления стронция растениями лиственницы и березы не различаются и составляют 4,8; для сосны этот коэффициент составил 2,0. Особенности перераспределения стронция характерны для отвалов буроугольного месторождения. Коэффициент аккумуляции стронция для березы значительно превосходит аналогичный показатель для сосны при произрастании на отвалах марганцевых руд – 1,0 и 0,6, соответственно. При развитии березы на грунтах карьера хромитового месторождения

коэффициент накопления стронция составляет 0,6, что не отличается от контрольного значения.

У древесных растений, развивающихся на отвалах буроугольного месторождения, наблюдается резкое увеличение коэффициента накопления кадмия в ряду береза – лиственница – сосна (6,7–97,6–238). Одновременно с этим коэффициент биоаккумуляции кадмия при произрастании на отвалах марганцевого месторождения для березы составил 8,7, в то время как для сосны 3,9. Для контрольных растений березы коэффициент биоаккумуляции кадмия 80,0, а у берез, произрастающих в карьере хромитового месторождения – 44,5. Распределение никеля в системе “почва–растение” характеризуется десятикратным увеличением коэффициента накопления металла растениями березы по сравнению с лиственницей – 0,7 и 0,07.

Особенности перераспределения металлов в системе “почва–растения” позволяют сделать вывод, что аккумулирующая способность древесных растений во многом зависит от условий произрастания и способности растений препятствовать проникновению металлов внутрь организма. Следует отметить, что исследуемые насаждения представляют собой 30-летние культуры, полнота которых составляет до 5000 шт/га, средний диаметр растений – 20 см, густота кроны не превышает 0,7, средняя высота растений – 5–7 м, у отдельных растений отмечается слабое плодоношение, при этом насаждения относятся к III–IV классу бонитета. Таким образом, на основании характеристик лесных культур и биоаккумулятивных свойств древесных растений можно произвести расчет количества металлов, накапливающихся в насаждениях и, соответственно, оценить тот вклад, который вносят растения в сохранение окружающей среды. Результаты этих расчетов представлены в табл. 30.

Показано, что насаждения березы бородавчатой и лиственницы Сукачева по сравнению с насаждениями сосны обыкновенной обладают наибольшей способностью к аккумуляции техногенных металлов.

Накопление металлов растениями, несомненно, определяет их средостабилизирующую и биосферную функции. Однако основы устойчивости и адаптивного потенциала растений в условиях техногенеза во многом остаются неизученными. Полученные нами данные о морфо-физиологических изменениях в древесных растениях в техногенных условиях позволяли сделать заключение об отсутствии специфических реакций растений на различных уровнях организации – молекулярном, физиологическом, клеточном и тканевом.

Изучение влияния металлов на содержание пигментов в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) показало,

Таблица 30

**Расчетные показатели биоаккумуляции металлов древесными
растениями (кг металла на 1 га насаждения)
[по Усольцеву, 2003]**

Металл	Береза бородавчатая				
	Листья	Ветви	Ствол	Корни	Всего
Барий	162	–	4154	3160	7476
Марганец	1967	1882	7732	17267	28848
Медь	142	763	1963	1237	4105
Цинк	257	1132	12002	16625	30016
Свинец	11	36	254	229	530
Железо	14859	–	450637	262575	728071
Стронций	257	836	2654	3481	7228
Кадмий	1,4	8,6	692	46	748
Никель	117	135	923	1191	2366
ИТОГО	17773,4	4792,6	481011	305811	809388

Металл	Лиственница Сукачева				
	Хвоя	Ветви	Ствол	Корни	Всего
Барий	–	–	–	–	–
Марганец	–	13246	122619	34339	170204
Медь	–	–	–	–	–
Цинк	–	2032	32827	4627	39486
Свинец	–	95	8883	646	9624
Железо	–	–	–	–	–
Стронций	–	1181	9076	1184	11441
Кадмий	–	5	135	54	194
Никель	–	76	2	0,5	78,5
ИТОГО	–	16635	173542	40850,5	231027,5

Металл	Сосна обыкновенная				
	Хвоя	Ветви	Ствол	Корни	Всего
Барий	104	451	2357	–	2912
Марганец	3880	2489	142659	6497	155525
Медь	110	–	1376	637	2123
Цинк	293	2196	22598	7963	33050
Свинец	17	16	39	1465	1537
Железо	16196	–	1206510	108927	1331633
Стронций	122	171	13166	1147	14606
Кадмий	4	4,9	590	38	636,9
Никель	31	–	1376	–	1407
ИТОГО	20757	5327,9	1390671	126674	1543430

что сумма хлорофиллов и каротиноидов к концу эксперимента в опытных образцах снижается (в случае ионов K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и Pb^{2+}), увеличивается (ионы Ba^{2+} и Zn^{2+}) и не изменяется (ионы Na^+ , Mn^{2+} и Cu^{2+}) по сравнению с контрольными. При действии на растения ионов металлов изменяется соотношение пигментов. Известно, что основным из фотосинтетических пигментов растений является хлорофилл А. При уменьшении содержания хлорофилла А в листьях происходит увеличение доли вспомогательных пигментов – хлорофилла В или каротиноидов, что может рассматриваться как адаптивная реакция ассимиляционного аппарата растений тополя бальзамического на избыток ионов металлов в растительном субстрате.

Установлено, что изменения в соотношении различных пигментов в листьях опытных растений в результате действия ионов K^+ в длительном эксперименте выглядит следующим образом: снижается доля хлорофилла А и каротиноидов и резко увеличивается количество хлорофилла В, затем отмечается значительное снижение доли хлорофилла В при увеличивающемся количестве каротиноидов, к концу эксперимента соотношение пигментов несколько отличается от контрольного – возрастает доля каротиноидов при снижении доли хлорофиллов в листьях. Ионы Na^+ и Ca^{2+} в целом обуславливают сходный характер изменений соотношения отдельных пигментов за исключением 12- и 24-х сут эксперимента, когда доля хлорофилла В значительно возрастает по отношению к хлорофиллу А и каротиноидам при действии Ca^{2+} . Действие ионов Mg^{2+} характеризуется довольно резкими изменениями в соотношении отдельных пигментов в листьях тополя бальзамического на протяжении всего эксперимента. Следует отметить, что к концу эксперимента доля хлорофилла А в листьях опытных растений по сравнению с контролем снижается.

При действии Ba^{2+} , Zn^{2+} и Pb^{2+} происходят скачкообразные изменения содержания пигментов в листьях тополя бальзамического. Показано, что большую часть эксперимента количество хлорофилла А в листьях опытных растений было меньше относительно контрольных образцов. К концу эксперимента отмечается снижение доли хлорофилла А при увеличении долей хлорофилла В и каротиноидов в листьях опытных растений относительно контрольных образцов.

Ионы Mn^{2+} и Cu^{2+} оказывают угнетающее действие на пигментный комплекс листьев тополя бальзамического в первой половине эксперимента, что выражается в снижении относительного количества хлорофилла А и увеличении доли второстепенных пигментов; во второй половине эксперимента отличается от других металлов тем, что доля хлорофилла А по сравнению с други-

ми пигментами увеличивается относительно контроля (в отличие от других металлов). При этом доля хлорофилла В и каротиноидов снижается.

Ионы металлов оказывают различное влияние на дыхание листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Исследования в том направлении позволили выделить несколько типов ответных реакций, выражающихся в изменении дыхания листьев: 1) после воздействия металлов (до 9-х сут) дыхание листьев опытных растений тополя резко снижается относительно контроля, затем отмечается увеличение дыхания (15-е сут), повторное резкое снижение (24-е сут) и нормализация дыхания к концу эксперимента – Ba^{2+} , Mg^{2+} и Pb^{2+} ; 2) сразу после обработки растений значение дыхания листьев резко снижается, затем наблюдается увеличение, после чего отмечается повторное незначительное снижение и нормализация дыхания – для ионов K^+ и Cu^{2+} ; 3) вначале происходит увеличение, затем резкое снижение, а на 15-е сут нормализация дыхания листьев опытных растений – для ионов Na^+ и Mn^{2+} и 4) ионы металлов не оказывают значительного влияния на дыхание листьев, происходит лишь незначительные изменения дыхания опытных растений в ходе эксперимента для ионов Zn^{2+} .

По характеру изменений дыхания листьев тополя Ca^{2+} можно отнести к первой группе. Однако в отличие от бария, магния и свинца, отнесенных к этой группе, при действии Ca^{2+} не происходит нормализации дыхания листьев опытных растений к концу эксперимента.

Выживание растений в условиях солевого стресса, каковым может считаться избыточное содержание катионов в окружающей среде, неизбежно сопряжено с увеличивающимися затратами энергии, высвобождающейся при дыхании. Эта энергия расходуется на поддержание баланса элементов между растением и окружающей средой. Интенсивность дыхания и изменения дыхания растений, таким образом, могут служить интегративными показателями состояния организма в условиях стресса. Установлено, что при действии ионов K^+ , Na^+ , Ba^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} происходит полное восстановление дыхания листьев тополя бальзамического в течение 30 сут. Лишь в случае с Ca^{2+} отмечается 30%-е снижение дыхания листьев опытных растений.

Обнаружение поливариантности ответных реакций тополя на резкое увеличение концентрации металлов в окружающей среде, выражающейся в изменении дыхания и содержания пигментов фотосинтеза в листьях, позволяет сделать заключение о функционировании комплекса адаптивных механизмов на молекулярно-физиологическом уровне, работа которого направлена

на стабилизацию энергетических затрат в условиях стресса. Следует отметить, что полное восстановление дыхания происходит как в случае с высокотоксичными ионами (Pb^{2+} и Cu^{2+}), так и в случае с ионами макроэлементов (Na^+ и K^+) и микроэлементов (Mg^{2+} и Mn^{2+}). Кроме того, механизмы интоксикации высокотоксичных ионов (Pb^{2+} и Cu^{2+}) сходны с механизмами интоксикации малотоксичных ионов (Mg^{2+} и K^+).

Металлы являются неотъемлемой составной частью природных биогеохимических циклов. Перераспределение металлов происходит за счет процессов выветривания и вымывания горных пород, вулканической деятельности, природных катаклизмов. В результате этих природных явлений нередко формируются природные геохимические аномалии. В последнее столетие интенсивная хозяйственная деятельность человека, связанная с добычей и переработкой полезных ископаемых привела к образованию техногенных геохимических аномалий.

На протяжении многих веков древесные растения приспосабливались к изменениям, которые естественным образом происходили в окружающей среде. Формирование адаптивного комплекса растений к условиям обитания связаны с масштабами этих изменений и скоростью их протекания. В настоящее время антропогенный пресс по интенсивности и своим масштабам нередко превосходит влияние экстремальных природных факторов. На фоне выявления феномена экологической видоспецифичности древесных растений установление факта отсутствия у растений металл-специфических ответных реакций имеет эколого-эволюционное значение, ставшее основой успешного их роста и развития в условиях действия экстремальных природных и техногенных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 170 с.
- Алексеев В.А.* Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. С. 38–54.
- Алексеева-Попова Н.В.* Накопление цинка, марганца и железа в растениях при разном уровне меди в среде // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. С. 54–64.
- Алексеева-Попова Н.В.* Специфичность металлоустойчивости и ее механизмов у высших растений // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине: Тез. докл. XI Всесоюз. конф. Самарканд, 1990. С. 260–261.
- Алексеева-Попова Н.В., Ильинская Н.Л.* Реакция отдельных видов и популяций на высокое содержание меди в среде // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. С. 42–53.
- Антипов В.Г.* Устойчивость древесных растений к промышленным газам. Минск: Наука и техника, 1979. 216 с.
- Атлас Башкирской АССР. М.: Гл. упр. геодезии и картографии при СМ СССР, 1976. 32 с.
- Бабушкина Л.Г., Луганский Н.А.* Комплексная оценка состояния лесных биогеоценозов в зоне промышленных загрязнений. Минск, 1990. С. 566–568.
- Балков В.А.* Водные ресурсы Башкирии. Уфа: Башк., кн. изд-во, 1978. 176 с.
- Бандман А.Л., Гудзовский Т.А., Дубейковская Л.С.* Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп. Л.: Химия, 1988. 431 с.
- Баславская С.С., Трубецкова О.М.* Практикум по физиологии растений. М.: Изд-во МГУ, 1964. С. 105–125.
- Баталов А.А., Гиниятуллин Р.Х., Кагарманов И.Р., Кулагин А.Ю.* Salicaceae – их участие в формировании растительного покрова техногенных ландшафтов Южного Урала // Флора и растительность Сибири и Дальнего Востока: Тез. докл. конф., посвящ. памяти Л.М. Черепнина / ИЛИД СО АН СССР. Красноярск, 1991. С. 73–74.
- Баталов А.А., Мартыанов Н.А.* О естественном возобновлении лиственных Сукачева в лесах водоохранный-защитного назначения Уфимского плато // Охрана и рациональное использование биологических ресурсов Урала. Свердловск, 1978. Вып. 1. С. 6–7.
- Баталов А.А., Мартыанов Н.А., Горюхин О.Б.* К вопросу о перспективности сосново-лиственных культур в окрестностях нефтехимических предприятий // Проблемы организации и ведения лесного и лесопаркового хозяйства в пригородных зонах: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. Свердловск, 1981. С. 127–128.
- Баталов А.А., Мартыанов Н.А., Горюхин О.Б.* Сосна и лиственница в системе промышленного фитофильтра // Вопросы ограничения циркуляции за-

грязняющих веществ в объектах окружающей среды: Тез. докл. Уфа, 1984. С. 25–26.

Бахтизин Н.Р. Угодья сельскохозяйственные // Башкортостан: Краткая энциклопедия. Уфа: Башкирская энциклопедия, 1996. С. 581.

Белова Н.А., Зверковский В.Н., Травлев Л.П., Тупика Н.П. Лесная рекультивация шахтных отвалов западного Донбасса // Тез. докл. VII Делегат. съезда ВБО. Л.: Наука, 1983. С. 324.

Берзиня А.Я. Загрязнение металлами растений в придорожных зонах автомагистралей // Загрязнение природной среды выбросами автотранспорта. Рига: Зинатне, 1980. С. 28–45.

Биоиндикация загрязнения наземных экосистем. М., 1988. 348 с.

Биоиндикация: Теория, методы, приложения / Под ред. Г.С. Розенберга. Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994. 266 с.

Большаков В.А. Загрязнение почв и растительности тяжелыми металлами. М.: Наука, 1978. 52 с.

Большаков В.А., Гальпер Н.Я., Клименко Г.А. и др. Загрязнение почв и растительности тяжелыми металлами. М.: ВНИИТЭИ- сельхоз ВАСХНИЛ, 1978. С. 52.

Борзенец В.А. Влияние промышленного загрязнения на содержание пигментов пластид в листьях древесных растений // Тез. докл. VII Делегат. съезда ВБО. Л.: Наука, 1983. С. 333–334.

Булатова М.С., Перетягина А.Д. Изменение температуры почвы на разнориентированных склонах в теплое время года // Вопросы физической географии Урала. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1975. Вып. 2. С. 108–111.

Бурцев С.А. Лесная рекультивация отвалов Курской магнитной аномалии // Учен. зап. Тарт. ун-та. 1983. Вып. 647. С. 45–49.

Важенин И.Г. О разработке предельно допустимых концентраций (ПДК) химических веществ в почве // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1983. Вып. 35. С. 3–6.

Ванин Л.И. Определитель деревьев и кустарников. М., Л.: Гослесбумиздат, 1956. 202 с.

Виноградов А.П. Химический элементный состав организмов и периодическая система Менделеева // Тр. Биохим. лаб. АН СССР. 1935. Т. 3. С. 67–278.

Власюк П.А., Шкварук Н.М., Сапатый С.Е., Шамотиненко Г.Д. Химические элементы и аминокислоты в жизни растений, животных и человека. Киев: Наук. думка, 1974. 218 с.

Воронин В.И. Дендроиндикация в системе мониторинга лесов, подверженных воздействию промышленных эмиссий // Лесопатологические исследования в Прибайкалье. Иркутск, 1989. С. 24–33.

Вредные химические вещества / А.Л. Бандман и др. Л.: Химия, 1988. 512 с.

Габитов Х.Ш. Лесная и деревообрабатывающая промышленность // Башкортостан: Краткая энциклопедия. Уфа: Башкирская энциклопедия, 1996. С. 372.

Гетко Н.В. Исследование состояния пластидных пигментов некоторых древесных растений в связи с их газоустойчивостью // Интродукция растений и окружающая среда. Минск, 1975. С. 141–144.

Гетко Н.В. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 208 с.

Гетко Н.В., Кулагин Ю.З., Яфаев Э.М. О газопоглощительной способности хвойных // Экология хвойных / БФАН СССР. Уфа, 1978. С. 112–120.

Гиниятуллин Р.Х., Баталов А.А., Кулагин А.Ю. Содержание некоторых металлов в листьях и ветвях *Populus balsamifera* L. в условиях промышленного загрязнения // Экология. 1999. № 1. С. 26–29.

Гиниятуллин Р.Х., Кулагин А.Ю., Кагарманов И.Р. Содержание некоторых металлов в надземных органах *Populus balsamifera* L. в условиях Предуралья (Стерлитамакский промышленный узел) // Там же. 1998. № 2. С. 94–97.

Глазовская М.А. Техногенез и проблемы ландшафтно-геохимического прогноза // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1968. № 1. С. 30–36.

Глазовская М.А. Техногеомы – исходные физико-географические объекты ландшафтно-геохимического прогноза // Там же. 1972. № 6. С. 23–35.

Глазовская М.А. Почвенно-геохимическое картографирование для оценки экологической устойчивости среды // Почвоведение. 1992. № 6. С. 5–15.

Головкин Т.К. Дыхание растений: (Физиологические аспекты). СПб., 1999. 204 с.

Гончарук Е.И. Санитарная охрана почвы от загрязнения химическими веществами. Киев, 1977. 160 с.

ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М., 1983.

Гроздов О.А., Соколова С.А. Биохимические и токсикологические исследования загрязнений водоемов. М., 1984. С. 52–67.

Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979. 200 с.

Гудков И.Н., Гуральчук Ж.З., Петрова С.А. Цитотоксическое и цитогенетическое действие цинка на растения и его снятие с помощью магния // Докл. АН УССР. 1986. № 12. С. 61–63.

Гуральчук Ж.З. Механизмы устойчивости растений к ТМ // Физиология и биохимия культ. растений. 1994. Т. 26, № 2. С. 107–117.

Гуральчук Ж.З. Эколого-физиологические аспекты действия повышенных концентраций цинка на растения // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Самарканд, 1990. С. 278–280.

Дашкевич А.П. Ассортимент газоустойчивых растений для озеленения санитарно-защитных зон и промышленных территорий Восточного Казахстана // Роль растений в оздоровлении воздушного бассейна городов Казахстана. Алма-Ата: Кайнар, 1982. С. 102–112.

Двораковский М.С. Экологическое значение важнейших макро- и микроэлементов для растений // Экология растений. М.: Высш. шк., 1983. С. 124–132.

Девидсон О., Юдкин П. Признаки голодания растений. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 223 с.

Добровольский В.В. Тяжелые металлы: Загрязнение окружающей среды и глобальная геохимия // Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 3–11.

Добровольский В.В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами // Почвоведение. 1999. № 5. С. 639–645.

Дылис Н.В. Сибирская лиственница: Материалы к систематике, географии и истории. М.: МОИП, 1947. 137 с.

Дылис Н.В. Лиственница. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 96 с.

Ефимова Н.А., Зубенок Л.И. Радиационный и тепловой баланс Урала // Проблемы физической географии Урала. Отд. геогр. М.: Изд-во МГУ, 1966. Т. 18. С. 134–142.

Жизнь растений. М., 1982. Т. 4. 448 с.

Загрязнение воздуха и жизнь растений / Под ред. М. Трешоу. Л., 1988. 527 с.

Зайцев Г.А. Особенности формирования корневых систем сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) в техногенных условиях Предуралья (Уфимский промышленный центр): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2000. 16 с.

Зимаков И.Е., Захарова Л.Л. Влияние промышленности на изменение фоновых уровней содержания кадмия в некоторых объектах окружающей среды // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине: Тез. докл. XI Всесоюз. конф. Самарканд, 1990. С. 31–33.

Зырин Н.Г., Обухов А.И. Спектральный анализ почв, растений и других биологических объектов. М.: Изд-во МГУ, 1977. 334 с.

Зырин Н.Г., Обухов А.И. Принципы и методы нормирования (стандартизации) содержания тяжелых металлов в почве и в системе почва–растение // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1983. Вып. 35. С. 7–10.

Ильин В.Б. Тяжелые металлы в почвах Западной Сибири // Почвоведение. 1987. № 11. С. 87–95.

Ильин В.Б. Фоновое содержание кадмия в почвах Западной Сибири // Агрохимия. 1991. № 5. С. 103–108.

Ильин В.Б., Степанова М.В. О фоновом содержании тяжелых металлов в растениях // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. наук. 1981. Вып. 1, № 5. С. 26–32.

Ильин В.Б., Степанова М.Д. Тяжелые металлы, защитные возможности почв и растений // Химические элементы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1982. С. 73–92.

Илькун Г.М. Газоустойчивость растений. Киев: Наук. думка, 1971. 146 с.

Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наук. думка, 1978. 247 с.

Илькун Г.М., Мотрук В.В. Физиолого-биохимические нарушения в растениях, вызываемые атмосферными загрязнителями. Киев, 1968. С. 75–88.

Кабанов Н.Е. Хвойные деревья и кустарники Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 175 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. С. 191–201.

Кагарманов И.Р. Биологические особенности тополей в связи с лесовосстановлением в техногенных условиях Предуралья. Уфа, 1995. 18 с.

Калинин М.И. Формирование корневой системы деревьев. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 152 с.

Калинин М.И. Корневедение: Учеб. пособие. Киев: УМК ВО, 1989. 195 с.

Каплунова Е.В. Трансформация соединений цинка, свинца в почвах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1983.

Касимов А.К. Фоновая оценка и некоторые закономерности функционирования лесных экосистем в зоне седиментации пыли и синтетических моющих средств // Физико-географические основы развития и размещения производственных сил Нечерноземья Урала. Пермь, 1985. С. 103–111.

Касимов Н.С., Самонова О.А., Асеева Е.Н. Фоновая почвенно-геохимическая структура лесостепи Приволжской возвышенности // Почвоведение. 1992. № 8. С. 5–20.

Каталог мировой коллекции ВИР. Устойчивость к ТМ (кадмий) на ранних этапах онтогенеза. С.-П., 1995. Вып. 671в.

Каталог мировой коллекции ВИР. Устойчивость к ТМ (никель) на ранних этапах онтогенеза. М., 1995. Вып. 670а.

Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 298 с.

Ковальский В.В., Кривицкий В.А., Алексеева С.А. и др. Южно-Уральский субрегион биосферы // Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР. 1981. Т. 19. С. 3–64.

Ковда В.А., Золотарева Б.И., Скрипчинский И.И. О биологической реакции растений на тяжелые металлы в среде // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 3. С. 766–768.

Комиссаров Д.А. Биологические основы размножения древесных растений черенками. М., 1964. 273 с.

- Коропачинский И.П.* Древесные растения Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. С. 142–150.
- Коришков И.И.* Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Киев, 1994. 52 с.
- Коришков И.И.* Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды. Киев, 1996. 235 с.
- Косицин А.В., Алексеева-Попова Н.В.* Действие тяжелых металлов на растения и механизмы металлоустойчивости // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. С. 5–22.
- Красильников П.К.* Классификация корневых систем деревьев и кустарников // Лесоведение. 1970. № 3. С. 35–44.
- Красинский Н.П.* Теоретические основы построения ассортиментов газоустойчивых растений // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые сорта. Горький: ГГУ, 1950. С. 9–109.
- Красинский Н.П., Побединская В.М.* Повреждения зеленых насаждений дымовыми отходами на промплощадках нефтяной промышленности и химической промышленности // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые сорта. Горький: М.: Дзержинец, 1950. С. 179–190.
- Кузьменко Л.А., Сивак Л.А.* Компартиментализация и взаимодействие микроэлементов в растениях // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Самарканд, 1990. С. 300–301.
- Кулагин А.Ю., Баталов А.А., Гиниятуллин Р.Х., Салихова Р.Н.* Роль древесных растений в ограничении циркуляции некоторых металлов в техногенных ландшафтах // Тяжелые металлы в окружающей среде: Материалы Междунар. симпозиума. Пущино, 1997. С. 43–49.
- Кулагин А.Ю., Кагарманов И.Р., Блонская Л.Н.* Тополя в Предуралье: Дендрологическая характеристика и использование. Уфа: Гилем, 2000. 124 с.
- Кулагин Ю.З.* Сравнительно-экологическая характеристика ольхи черной и серой, березы пушистой и сосны обыкновенной в условиях заболоченных лесов Ильменского заповедника // Флора и растительность Ильменского государственного заповедника им. В.И. Ленина. Свердловск, 1961. Вып. 8. С. 145–155.
- Кулагин Ю.З.* Особенности распространения лиственницы Сукачева на Южном Урале // Науч. конф., посвящ. 50-летию Башкирской АССР: Реф. докл. Уфа, 1969. С. 132–133.
- Кулагин Ю.З.* Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука, 1974. 125 с.
- Кулагин Ю.З.* Индустриальная дендрология и прогнозирование. М.: Наука, 1985. 117 с.
- Кулешова Т.Н.* Изучение солеустойчивости семян тополя белого. Киев, 1965. С. 256–260.
- Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под редакцией В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.
- Лесотаксационный справочник. М.: Лес. пром-сть, 1980. 288 с.
- Лукашев В.К., Симуткина Т.Н.* Особенности распределения и формы соединений микроэлементов в почвах крупного промышленного города // Почвоведение. 1984. № 4. С. 43–52.
- Лукьянец А.И., Шилова И.И.* Ландшафтно-экологическое зонирование территорий, подверженных воздействию дымо-газовых выделений металлургических предприятий Урала // Человек и ландшафты. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. С. 28–31.

- Мак-Милан Броуз Ф.* Размножение растений. М.: Мир, 1987. 190 с.
- Максютов Ф.А.* Барьерный эффект гор и ландшафты Южного Урала и Приуралья // Вопросы физической географии и геоморфологии Урала и сопредельных территорий. Уфа, 1974. Вып. 68, № 5. С. 18–37.
- Малый практикум по физиологии растений: Учеб. пособие. 9-е изд., перераб. и доп. / Под ред. А.Т. Мокроносова. М.: Изд-во МГУ, 1994. 184 с.
- Матвеев Н.М., Павловский В.А., Прохорова Н.В.* Экологические основы аккумуляции тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Самар. ун-т, 1997. 100 с.
- Махнев А.К., Мамаев С.А.* Итоги исследований по проблемам создания защитных и декоративных зеленых насаждений в условиях медеплавильных заводов на Урале // Проблемы создания защитных насаждений в условиях техногенных ландшафтов. Свердловск, 1979. С. 3–47.
- Махонина Г.И.* Химический состав растений на промышленных отвалах Урала. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1987. 168 с.
- Методические рекомендации по обследованию и картографированию почвенного покрова по уровням загрязненности промышленности выбросами / Сост. И.Г. Важенин; Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М., 1987. 25 с.
- Микроэлементы в окружающей среде / Под ред. П.А. Власюка. Киев: Наук. думка, 1980. 57 с.
- Нестерова А.Н.* Действие тяжелых металлов на корни растений. 1. Поступление свинца, кадмия, цинка в корни, локализация металлов и механизмы устойчивости растений // Биол. науки. 1989. № 9. С. 72–86.
- Николаевский В.С.* Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
- Николаевский В.С.* Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М.: МГУЛ, 1998. 191 с.
- Определитель высших растений Башкирской АССР / Ю.Е. Алексеев, Е.Б. Алексеев, К.К. Габбасов и др. М.: Наука, 1988. 316 с.
- Орлов А.Я., Кошельков С.П.* Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с.
- Оценка экологического состояния окружающей среды: Материалы ежегодной рабочей сессии Учебно-научного центра “Современные методы оценки экологического состояния окружающей среды” на базе СПбГУ и БИН РАН / Под ред. М.Г. Опекуновой, Н.В. Алексеевой-Поповой. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2001. 169 с.
- Пасынкова М.В.* Проблемы охраны окружающей среды при добыче медной руды открытым способом // Биоразнообразие и биоресурсы Урала и сопредельных территорий: Материалы Междунар. науч. конф. Оренбург: Газпромпечатать, 2001. С. 364–365.
- Паушева З.П.* Практикум по цитологии растений. М.: Колос, 1974. 30 с.
- Петрунина Н.С.* Проблемы геохимической экологии организмов. М.: Наука, 1974. 142 с.
- Пигулевская Т.К.* К вопросу о механизмах токсического действия металлов на растения // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Самарканд, 1990. С. 316–317.
- Плотникова Л.С., Хромова Т.В.* Размножение древесных растений черенками. М., 1981. 56 с.
- Плохинский Н.А.* Биометрия. М., 1970. 367 с.
- Побединский А.В.* Сосна. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 128 с.
- Поздняков Л.К.* Даурская лиственница. М.: Наука, 1975. 312 с.
- Поликарпов Н.П.* Формирование сосновых молодняков в разных типах леса южной тайги: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1958. 20 с.

Почвоведение / Под ред. И.С. Кауричева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1989. 719 с.

Почвы Башкортостана / Под ред. Ф.Х. Хазиева. Уфа; Гилем, 1997. Т. 1. 384 с.

Почвы Башкортостана / Под ред. Ф.Х. Хазиева. Уфа; Гилем, 1997. Т. 2. 328 с.

Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. М.: Наука, 1964. 190 с.

Протасова Н.А., Щербакова А.П., Копеева М.Т. Редкие и рассеянные элементы в почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1992. 168 с.

Прохорова Н.В., Матвеев Н.М., Павловский В.А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Самар. ун-т, 1998. 97 с.

Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. 176 с.

Ратнер Е.И. Пути приспособления растений к условиям питания катионами в почве // Проблемы ботаники. М., 1950. Вып. 1. С. 427–448.

Рахтеенко И.Н. Рост и формирование корневой системы сосны в различных типах леса // Дендрология и лесоведение. Минск, 1967. С. 100–116.

Реймерс Н.Ф., Яблоков А.В. Словарь терминов и понятий, связанных с охраной живой природы. М., 1982. 145 с.

Розенберг Г.С., Краснощеков Г.П., Крылов Ю.М. и др. Устойчивое развитие: Мифы и реальность. Тольятти: ИЭВБ РАН, 1998. 198 с.

Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусиловский П.М. Экологическое прогнозирование: (Функциональные предикторы временных рядов). Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994. 185 с.

Рыбальский Н.Г., Жакетов О.Л., Ульянова А.Е., Шепелев Н.П. Экологические аспекты экспертизы изобретений. М.: ВНИИПИ, 1989а. Ч. 1. С. 205–225.

Рыбальский Н.Г., Жакетов О.Л., Ульянова А.Е., Шепелев Н.П. Экологические аспекты экспертизы изобретений: (Справочник эксперта и изобретателя). М.: ВНИИПИ, 1989б. Ч. 2. С. 31.

Рябинин В.М. Защита лесов от дыма и газов // Лесн. хоз-во. 1962. № 8. С. 52–53.

Сабинин Д.А. Физиологические основы питания растений. М.: Наука, 1965. 512 с.

Сапожникова С.А. Микроклимат и местный климат. Л.: Гидрометеиздат, 1950. 242 с.

Сергейчик С.А. Древесные растения и оптимизация промышленной среды. Минск: Наука и техника, 1984. 168 с.

Сергейчик С.А. Устойчивость древесных растений в техногенной среде. Минск: Наука и техника, 1994. 279 с.

Система оценки степени деградации почв / В.В. Снакин и др. Пущино, 1992. 19 с.

Скарлыгина-Уфимцева М.Д., Черняхов В.Б., Березкина Г.А. Биогеохимические особенности медноколчеданных месторождений Южного Урала. Л.: Наука, 1976. 150 с.

Сметанина Е.Э. Сравнительная эколого-биологическая характеристика видов семейства Pinaceae в условиях техногенного загрязнения (на примере Уфимского промышленного центра): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2000. 16 с.

Сукачев В.Н. Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1966. 333 с.

- Сукачев В.Н., Зонн Е.В., Мотовилов Г.Н. Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 115 с.
- Тарабрин В.П., Кондратюк Е.Н., Баикатов В.Г. и др. Фитотоксичность органических и неорганических загрязнителей. Киев, 1986. 216 с.
- Тарабрин В.П., Чернышева Л.В., Макогонов В.С., Хонахбаев В.Н. Повреждение растений сернистым ангидридом // Растительность и промышленная среда. Киев: Наук. думка, 1971. С. 21–29.
- Тахтаджян А.Л. Высшие растения. М.; Л.: Изд-во АН АССР, 1956. Т. 1. 488 с.
- Тахтаджян А.Л. Система и филогения цветковых растений. М.; Л., 1966. 600 с.
- Тимофеев В.П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 159 с.
- Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с.
- Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах / РАСХН. М.: Агро-эколас, 1994. 288 с.
- Урал и Предуралье. М.: Наука, 1968. 462 с.
- Усманов И.Ю., Рахманкулова З.Ф., Кулагин А.Ю. Экологическая физиология растений. М.: Логос, 2001. 224 с.
- Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: Предельная продуктивность и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 406 с.
- Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов / Под ред. Н.В. Алексеевой-Поповой. Л., 1991. 189 с.
- Ушаков Р.Н., Костин Я.В., Асеева Н.Н. Проблема буферной кислотности основных типов почв Рязанской области // Тез. докл. III съезда Докучаев. о-ва почвоведов. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2000. Кн. 1. С. 310–311.
- Фаткуллин Р.А. Природные условия Башкортостана. Уфа, 1994. 176 с.
- Физиология растительных организмов и роль металлов / Под ред. Н.М. Чернавской. М., 1989. 150 с.
- Флора СССР / Под ред. В.Л. Комарова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1934. Т. 1. 300 с.
- Фрейберг И.А. Солонцеустойчивость берез в лесостепном Зауралье // Лесоведение. 1969. № 6. С. 82–85.
- Хазиев Ф.Х., Багаутдинов Ф.Я., Сахабутдинова А.З. Экоотоксиканты в почвах Башкортостана. Уфа: Гилем, 2000. 62 с.
- Хисматов М.Ф. Башкирия: (Экономико-географический очерк). 2-е изд., перераб. и доп. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1979. 192 с.
- Хисматов М.Ф. Башкирия моя. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1987. 160 с.
- Царева Р.П. Биоэлектрическая реакция тополя на солевой стресс. Воронеж, 1988. С. 78–84.
- Чепик Ф.А. Определитель деревьев и кустарников. М.: Агропромиздат, 1985. 320 с.
- Черных Н.А. Изменение содержания ряда химических элементов в растениях под действием различных количеств тяжелых металлов в почве // Агрохимия. 1991. № 3. С. 68–76.
- Чуваев П.П., Кулагин Ю.З., Гетко Н.В. Вопросы индустриальной экологии и физиологии растений. Минск: Наука и техника, 1973. 56 с.
- Чурагулова З.С. О защитном лесоразведении в Башкирском Зауралье. Уфа, 1998. 93 с.
- Шахова О.В. Насыщенность почвы корнями в сосняке и березняке кислично-черничных // Лесоведение. 1976. № 1. С. 8–91.

Шварц С.С. Экологические закономерности эволюции. М.: Наука, 1980. 278 с.

Шилова И.И., Лукьянец А.И., Токмакова С.Г. Трансформация биогеоценозов под воздействием дымо-газовых эмиссий медеплавильных предприятий Урала // Экспериментальная биогеоценология и агроценозы: Тез. докл. Всесоюз. совещ. М.: Наука, 1979. С. 208–210.

Шилова И.И., Махнев А.К., Лукьянец А.И. Геохимическая трансформация почв и растительности в районах функционирования предприятий цветной металлургии // Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 14–32.

Шугай Л.С. Первичное почвообразование на отвалах вскрышных пород под культурой сосны // Почвоведение. 1997. № 2. С. 247–253.

Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 300 с.

Юлашев И.С., Морозов Н.Ф. Опыт создания культур лиственницы в Туймазинском производственном лесохозяйственном объединении Башкирской АССР // Опыт выращивания лесных культур лиственницы в РСФСР. М.: Лесн. пром-сть, 1976. С. 94–95.

Яговой П.Н., Шендевицкий В.И., Ивчук Н.Н. К вопросу о задержке радиоактивной пыли зелеными насаждениями // Гигиена и санитария. 1966. № 7. С. 88–90.

Ягодин Б.А. Агрохимия и мониторинг состояния окружающей среды // Изв. ТСХА. 1990. № 5. С. 113–118.

Ягодин Б.А., Максимова Е.Н., Саблина С.М. Проблемы микроэлементов в биологии // Агрохимия. 1988. № 7. С. 126–134.

Яковлев А.С., Кузнецов В.П., Матвеев Ю.М., Симонов В.Д. Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. М., 1993. 38 с.

Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1997. 210 с.

Ярмишко В.Т., Цветков В.Ф. Строение, запасы и распределение в почве корневых систем растений в сообществах сосновых молодняков Кольского полуострова // Ботан. журн. 1987. № 4. С. 496–505.

Яфаев Э.М. Лесные культуры в окрестностях Уфимской группы нефтеперерабатывающих заводов // Комплексное ведение лесного хозяйства Башкирии. Уфа, 1975. С. 68–70.

Anderson A.G., Meyer S.R., Mayer F.K. Heavy metal toxicities levels of nickel, cobalt and chromium in the soil and plants associated with visual symptoms and variation in growth of an outcrop // Austrfl. J. Agr. Res. 1973. Vol. 24. P. 557–563.

Antonovics J., Bradshaw A.D., Turner R.J. Heavy metal tolerance in plants // Adv. Ecol. Res. 1971. Vol. 7. P. 1–85.

Bergquist U., Sundbom M. Copper health and hazard. Stockholm, 1978. 222 p.

Bingham F.T. et al. Growth and cadmium accumulation in plants grown on a soil treated with cadmium enriched sewage sludge // J. Environ. Qual. 1975. N 4. P. 207–211.

Broyer T.C., Johnson S.M., Paul R.E. Some aspects of lead in plant nutrition // Plant and Soil. 1972. Vol. 36. P. 301–313.

Cadiz R.T., Los Santos M.A. Trees as biological control against air pollution // Canopy. 1982. Vol. 8, N 11. P. 77.

Clark R.B. Plant genotype differences in uptake, translocation, accumulation and use of mineral elements required for plant growth // Genetic aspects of plant nutrition. The Hague etc.: Martinus Nijhoff, 1983. P. 49–70.

Craun G.E. Groundwater pollution microbiology / Eds. by G. Bitton, Ch. Gebra. N.Y. etc., 1984. P. 135–179.

- Dassler H.G.* // Reaktionen von Genolzen auf Immissionen und Schlussfolgerungen für den Anbau. Begründung in Industriegebieten. Ref.d. 7. Dendrol. Kongr. soz. Lander. 29. juni bis. 3 Juli 1979 in Dresden. KB d. DDR. Graph. Werkst. Zittou. 1981. S. 31–36.
- Epstein E.* Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. N.Y.: Wiley, 1972. 412 p.
- Ernst W.* Physiological and biochemical aspects of metal tolerance // Effects of air pollutants on plants. L., 1976. P. 115–133.
- Farago M., Cole M.* Nickel and plants // Metal ions in biological systems. N.Y.; Basel: Marsel Dekker, 1988. Vol. 23. P. 47–82.
- Foy C.D., Chaney R.L., White M.C.* The physiology of metal toxicity in plants // Annu. Rev. Plant Physiol. 1978. Vol. 29. P. 511–547.
- Gough L.P., Sharklette H.T., Case A.A.* Element concentrations toxic to plants, animals and man // US Geol. Surv. Bull. 1979. N 1466. P. 80–86.
- Hanisch B., Kilz E.* Waldschäden erkennen Fichte und Kiefer. Stuttgart: Ulmer, 1990. 334 S.
- Holstead R.L., Finn B.I., MacLean A.I.* Extractability of nickel added to soils and its concentration in plants // Canad. J. Soil Sci. 1969. Vol. 49. P. 335.
- Jarvis S.C., Lohes L.H.P., Hopper M.J.* Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots // Plant and Soil. 1976. Vol. 44, N 1. P. 179–191.
- Karlsson V. et. al.* // Chemosphere. 1985. Vol. 14. N 8. P. 1127–1131.
- Kuboi T.* Differences in the uptake and translocation of cadmium among plant species // Trans. XIV Congr. of ISSS. Kyoto, 1990. Vol. 4. P. 692–693.
- Kuboi T., Noguchi A., Yazali J.* Family dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants // Plant and Soil. 1986. Vol. 92. P. 405–415.
- Kulagin A.Yu., Batalov A.A.* Contents of some metals in Salicaceae leaves of technogenical ecotopes // Bioindicators deteriorisationis regionis: Proc. 5th Intern. conf. Česke Budejovice, May 23–27, 1988 / Inst. Landcape Ecol. ČAS. Česke Budejovice, 1989. P. 278.
- Metal ions in biological systems / Ed. H. Sigel. N.Y.; Basel: Marsel Dekker, 1988. Vol. 23. 463 p.
- Patterson C.C.* Lead in the environment // Conn. Med. 1971. N 35. P. 1–53.
- Peterson P.J.* Element accumulation by plants and their tolerance in toxic mineral soils // Proc. Intern. conf. "Heavy metals in the environment". Toronto, 1975. Vol. 11. P. 39–54.
- Putenikhin V.P., Martinsson O.* Present distribution of *Larix sukaczewii* Dyl. in Russia. Stockholm, 1995. 78 p. (Swed. Univ. of Agr. Sci. Dep. of Silviculture. Rep.; N 38).
- Roberts J.* A study of root distribution and growth in a *Pinus sylvestris* L. (Scots pine) plantation in East Anglia // Plant and Soil. 1976. Vol. 44, N 3. P. 607–621.
- Scheiber E.* Waldsterben-Konsequenzen für die Wirtschafts-, Agrar- und Umweltpolitik // Öster. Ing.- und Archit. Ztschr., 1990. Bd. 135, N 3. S. 127–135.
- Schober R.* Die Larche. Hanower, 1949. 260 S.
- Sillen L.G., Martell A.E.* Stability constants of metal-ion complexes. L.: Chem. Sci., 1964. 253 p.
- Smith W.H.* Air pollution and forests: Inveration between air contaminants and forest ecosystems. N.Y., 1981. 381 p.
- Thomas R.P.* Distribution of birch (*Betula* spp.), willow (*Salix* spp.) and poplas (*Populus* spp.): Secondary metabolites and their potential role as chemical defense against herbivores // J. Chem. Ecol. 1984. Vol. 10, N 3. P. 499–520.
- Turner R.J.* Heavy metal tolerance in plants // Ecological aspects of the mineral nutrition of plants: Proc. of the IX Intern. symp. Oxford: Brit. Ecol. Soc.: Blackwell, 1969. P. 399–420.
- Wood J.M.* Biological cycles for toxic elements in the environment // Science. 1974. Vol. 183. P. 1049–1059.

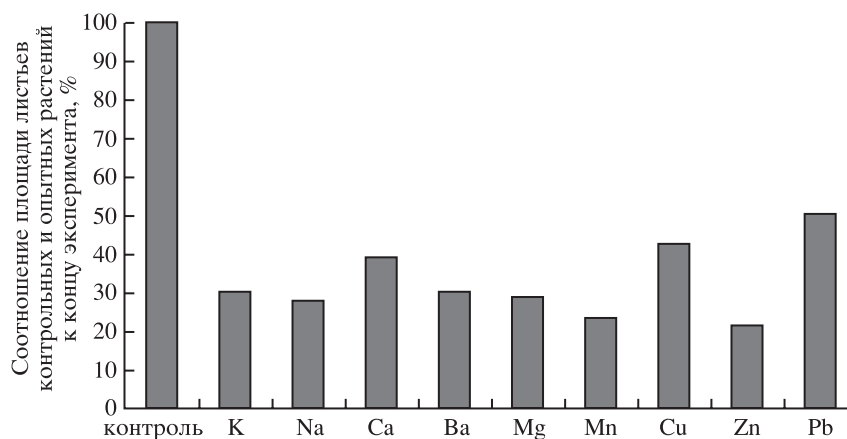
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Распускание листьев у черенков тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), выращенных в условиях избыточного содержания ацетатов металлов в водных растворах

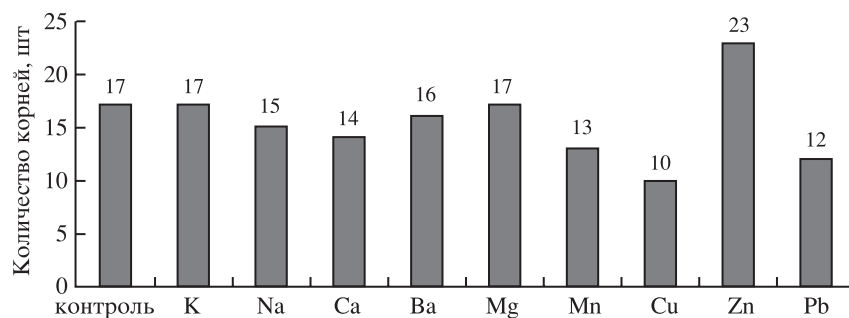
Металл	Доля черенков, у которых раскрылись все почки, %	Количество дней, затраченных на распускание первых листьев
Контроль	100	6
K	80	4
Na	85	15
Ca	43	1
Ba	95	6
Mg	95	5
Mn	85	5
Cu	36	14
Zn	85	6
Pb	85	6

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



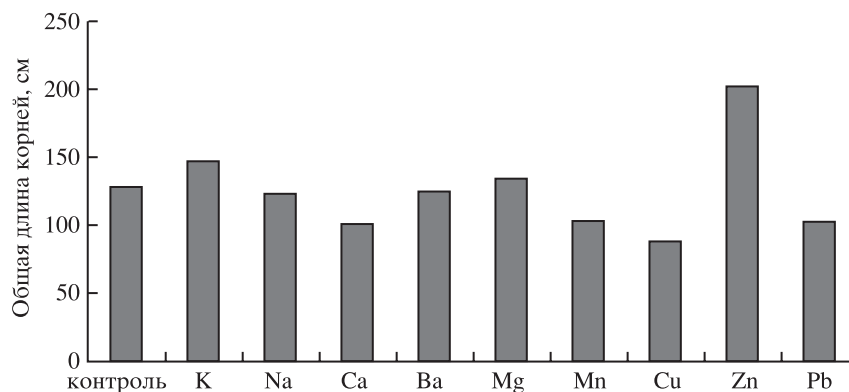
Площадь поверхности листьев растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 65-е сутки эксперимента, выращенных в условиях водной культуры при повышенной концентрации ионов металлов в растительном субстрате (% от площади листьев контрольных растений)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



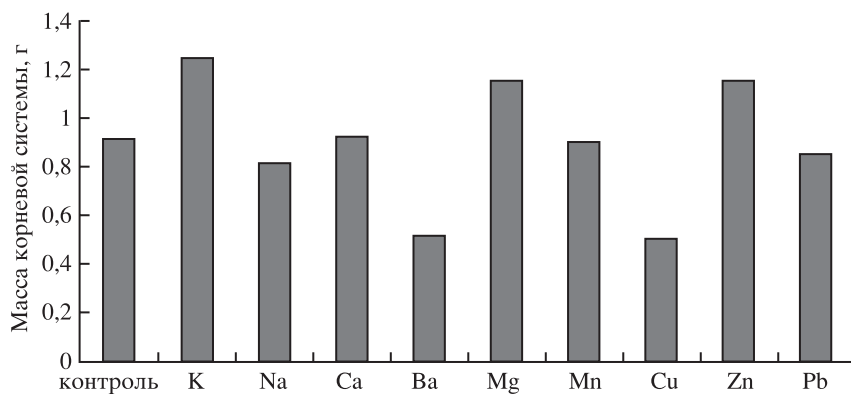
Изменения количества (шт.) корней первого порядка в результате действия сублетальных концентраций металлов (однократная обработка) на растения тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) - песчаная культура.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



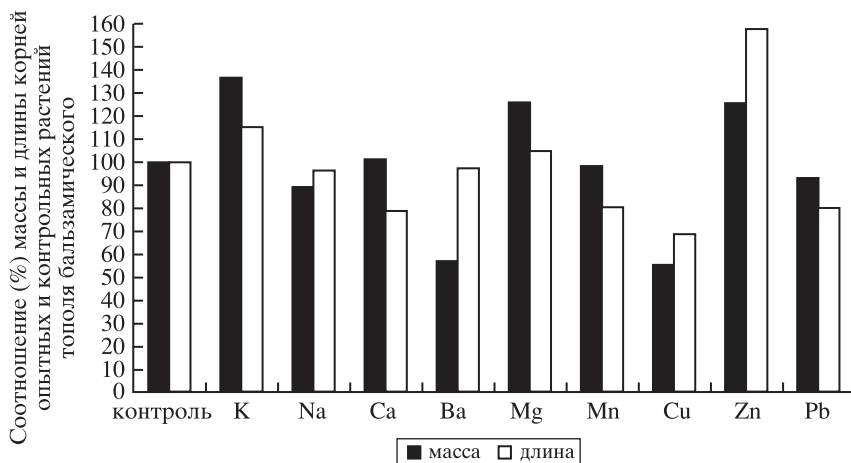
Изменения общей длины (см) корней первого порядка, обусловленные действием сублетальных концентраций металлов (однократная обработка) на растения тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) - песчаная культура.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5



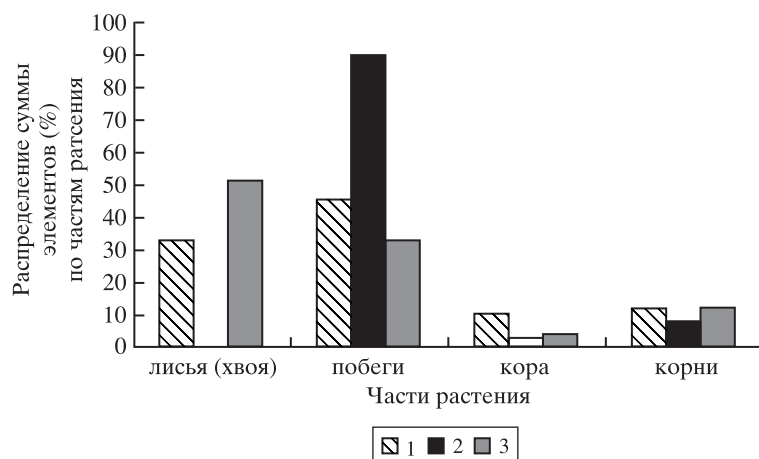
Изменения массы корневых систем (г) в результате действия сублетальных концентраций металлов (однократная обработка) на растения тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) - песчаная культура

ПРИЛОЖЕНИЕ 6



Соотношение (%) массы корневой системы и длины корней первого порядка опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 30-е сутки эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей металлов повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 7



Распределение (в %) элементов в различных органах древесных растений. 1 – береза бородавчатая (*Betula pendula* Roth.), 2 – лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и 3 – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Доля (%) некоторых элементов в растениях березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – представлены данные о суммарном распределении элементов в целом растении.

Доля элемента, %	Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Cr	2,7	0,8	2,4
Mn	7,8	38,8	23,6
Co	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
Ni	0,9	0,2	–
Cu	1,7	–	–
Zn	2,9	6	–
Sr	2,7	3,9	0,9
Cd	менее 0,1	0,1	менее 0,1
Mo	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
Pb	0,14	0,4	0,3
Hg	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
Ag	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
As	0,17	менее 0,1	менее 0,1
P	80,8	49,3	71,8
Суммарное содержание элементов в растении, в ppm	15385,95	9911,56	11277,50

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Содержание тяжелых металлов (ppm) в образцах почвогрунтов (0–10 см) на степных и облесенных участках промышленных отвалов Кумертауского бурогольного разреза.

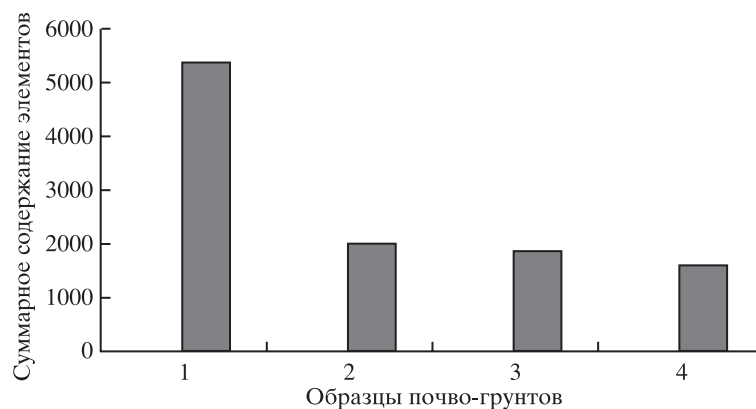
Элемент	Степной необлесенный участок	Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Cr	15±3,8	353±97,4	341±92,1	238±81,7
Co	2,3±0,7	22±8,6	22±6,9	22±8,2
Mo	0,23±0,08	0,7±0,2	0,55±0,17	0,71±0,26
Pb	1,5±0,4	13±4,7	19±5,3	10±3,0
Hg	0,03±0,009	0,06±0,02	0,1±0,02	0,04±0,01
As	0,51±0,13	27±6,9	17±5,5	18±5,8
Mn	991±267,2	601±173,8	673±199,1	514±152,7
Ni	876±216,7	207±62,4	253±76,3	231±63,8
Sr	181±49,0	86±21,9	83±23,7	55±14,2
Cd	5,4±1,1	0,55±0,16	0,15±0,04	0
P	3300±990	692±216,7	294±53,1	526±159,8
Cu	0	0	81±21,8	0
Ag	0	0	0,06±0,02	0
Zn	11±3,4	0	77±21,9	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Суммарное содержание (средние значения) техногенных элементов (ppm) в почвах и растениях на промышленных отвалах Кумертауского бурогольного разреза.

Показатель	Береза бородавчатая	Лиственница Сукачева	Сосна обыкновенная
Сумма элементов в растении, ppm	15385,95	9911,56	11277,50
Сумма элементов в почве под растениями, ppm	2002,31	1860,86	1614,36
Отношение суммы элементов в растении к сумме элементов в почве под растениями	7,7	5,3	7

ПРИЛОЖЕНИЕ 11



Суммарное содержание (ppm) элементов в почвах под насаждениями древесных растений и в грунте степного необлесенного участка отвалов Кумертауского буроугольного разреза. 1 – грунт степного необлесенного участка; 2 – почва под насаждениями березы бородавчатой; 3 – почва под насаждениями лиственницы Сукачева; 4 – почва под насаждениями сосны обыкновенной.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12



Соотношение (%) количества здоровых и поврежденных листьев растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 65-е сутки эксперимента, выращенных в условиях водной культуры при повышенной концентрации ионов металлов в растительном субстрате.

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Соотношение (%) здоровых и поврежденных листьев у растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), выращенных в условиях избыточного содержания ацетатов металлов в среде.

Металл	Соотношение листьев черенков тополя бальзамического, %	
	Здоровые	Поврежденные
Контроль	100	–
K	34	66
Na	50	50
Ca	20	80
Ba	10	90
Mg	29	71
Mn	–	100
Cu	30	70
Zn	40	60
Pb	40	60

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Соотношение различных видов хлорозов (%) у листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), выращенных в условиях избыточного содержания ацетатов металлов в среде.

Металл	Соотношение листьев черенков тополя бальзамического, %	
	Здоровые	Поврежденные
Контроль	100	–
K	34	66
Na	50	50
Ca	20	80
Ba	10	90
Mg	29	71
Mn	–	100
Cu	30	70
Zn	40	60
Pb	40	60

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Соотношение различных видов некрозов (%) у листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), выращенных в условиях избыточного содержания ацетатов металлов в среде.

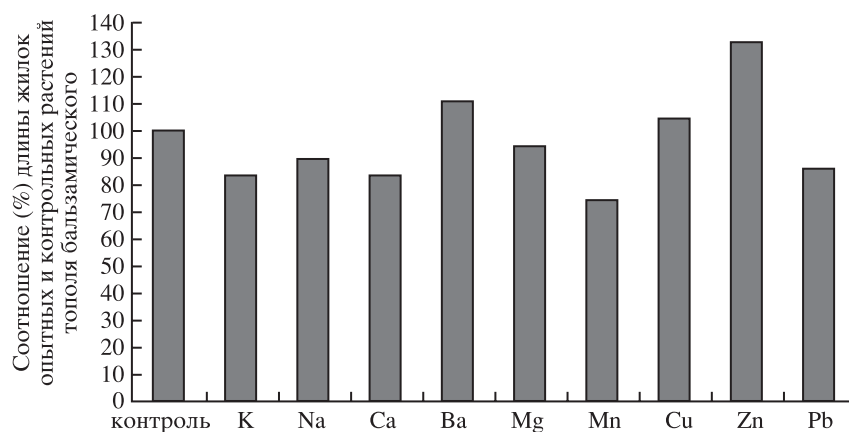
Металл	Некрозы, % пораженных листьев от общего количества распустившихся			
	Краевой	Межжил- ковый	По централь- ной жилке	Некрозные пятна
Контроль	—	—	—	—
K	—	—	16	—
Na	5	—	—	—
Ca	—	—	—	—
Ba	20	—	—	10
Mg	2	—	14	—
Mn	6	—	18	—
Cu	—	10	—	—
Zn	—	—	—	—
Pb	4	5	—	2

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Соотношение повреждений (%) листьев в виде усыхания и скручивания у тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), выращенных в условиях избыточного содержания ацетатов металлов в среде.

Металл	Повреждения листьев, % от общего количества всех распустившихся	
	Усыхание	Скручивание
Контроль	—	—
K	7	—
Na	15	—
Ca	—	20
Ba	—	50
Mg	7	—
Mn	—	50
Cu	—	—
Zn	—	—
Pb	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 17



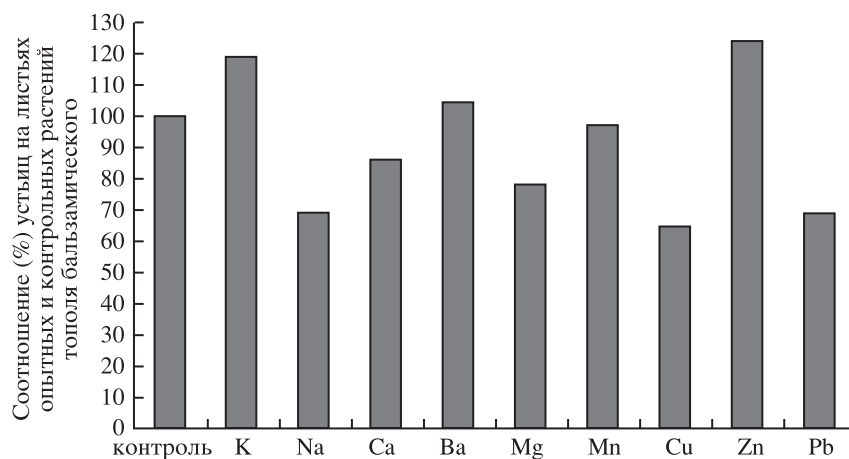
Соотношение (%) длины жилок листьев опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 30-е сутки эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей металлов повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 18

Длина жилок (мм/мм²) листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), при однократном действии сублетальных концентраций ионов металлов на 30-й день эксперимента

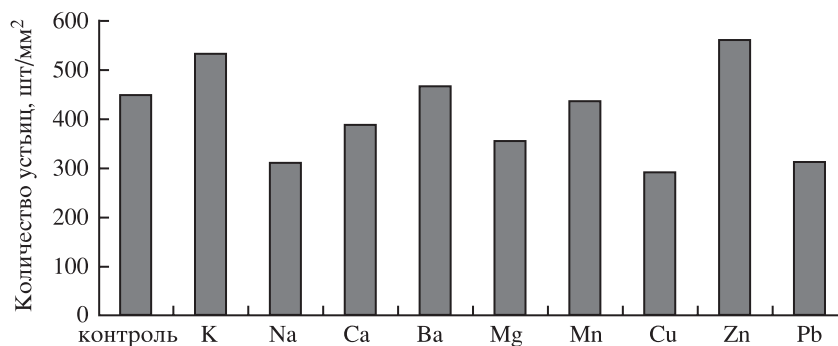
Металл	Длина жилок, мм/мм ²			
	Верхняя часть листа	Средняя часть листа	Нижняя часть листа	Среднее значение
Контроль	0,82±0,01	0,86±0,02	0,87±0,02	0,85±0,01
K	0,71±0,02	0,71±0,02	0,70±0,01	0,71±0,01
Na	0,80±0,02	0,79±0,01	0,69±0,03	0,76±0,02
Ca	0,73±0,03	0,69±0,01	0,72±0,02	0,71±0,01
Ba	0,98±0,04	0,91±0,01	0,93±0,02	0,94±0,02
Mg	0,82±0,01	0,80±0,02	0,79±0,01	0,80±0,01
Mn	0,66±0,02	0,65±0,01	0,60±0,02	0,63±0,01
Си	0,88±0,03	0,87±0,02	0,93±0,05	0,89±0,03
Zn	1,13±0,02	1,14±0,03	1,13±0,03	1,13±0,01
Pb	0,75±0,01	0,75±0,03	0,70±0,03	0,73±0,03

ПРИЛОЖЕНИЕ 19



Соотношение (%) количества устьиц на листьях опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 30-е сутки эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей металлов повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 20



Относительное количество устьиц (шт/мм²) у листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) при действии сублетальных доз различных металлов (однократная обработка) на растения – песчаная культура

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

Морфологические изменения верхних частей листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в результате однократного действия на растения сублетальных концентраций ионов различных металлов – песчаная культура (толщина указана в мкм).

Металлы	Верхняя кутикула	Верхний эпидермис	Столбчатая паренхима	Губчатая паренхима	Нижний эпидермис	Нижняя кутикула	Сумма
Контроль	2,69±0,33	12,26±0,4	53,26±0,84	63,17±0,62	16,63±0,62	5,71±0,33	153,72±1,16
K ⁺	3,02±0,40	15,12±1,38	69,05±4,01	76,94±3,02	19,66±1,34	6,55±0,62	190,34±9,58
Na ⁺	2,79±0,31	10,58±0,40	61,32±1,16	68,21±0,81	15,65±0,40	5,38±0,40	163,8±1,65
Ca ²⁺	3,02±0,38	16,13±0,62	72,41±2,62	77,11±2,82	20,16±0,63	5,21±0,32	194,04±2,45
Ba ²⁺	3,55±0,34	15,46±0,41	55,44±0,74	64,01±1,42	17,98±0,69	6,05±0,33	162,46±2,48
Mg ²⁺	3,19±0,27	14,78±0,39	68,71±1,42	77,95±1,43	19,66±0,88	5,71±0,31	190,01±1,98
Mn ²⁺	2,69±0,33	11,42±0,40	47,21±0,62	54,77±0,33	15,62±0,66	4,54±0,40	136,25±0,81
Cu ²⁺	3,53±0,32	15,12±0,52	59,98±0,40	67,70±0,66	19,15±0,33	6,38±0,42	171,86±2,08
Zn ²⁺	2,86±0,41	12,10±0,84	39,14±1,85	48,72±4,07	16,46±0,40	4,58±0,49	123,82±2,83
Pb ²⁺	2,86±0,40	11,42±0,66	56,95±0,62	65,69±0,33	17,47±0,62	5,21±0,33	159,6±0,90

ПРИЛОЖЕНИЕ 22

Морфологические изменения средних частей листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в результате однократного действия на растения сублетальных концентраций ионов различных металлов – песчаная культура (толщина указана в мкм)

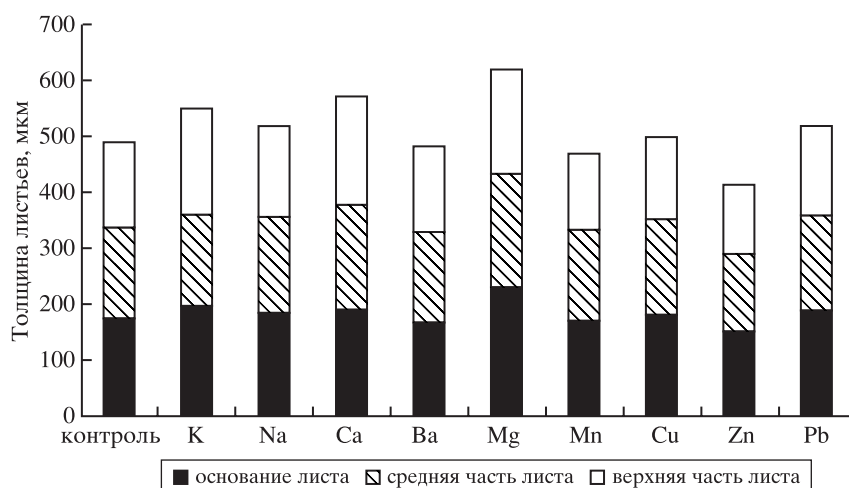
Металлы	Верхняя кутикула	Верхний эпидермис	Столбчатая паренхима	Губчатая паренхима	Нижний эпидермис	Нижняя кутикула	Сумма
Контроль	3,53±0,33	14,28±0,52	56,78±0,40	65,52±0,90	17,14±0,40	5,38±0,40	162,62±1,23
K ⁺	2,71±0,19	13,10±0,40	59,30±1,92	69,05±3,39	16,97±0,62	5,56±0,43	166,66±5,01
Na ⁺	3,53±0,31	12,77±0,33	60,82±0,66	70,06±0,84	21,50±0,84	5,54±0,50	174,22±1,70
Ca ²⁺	3,53±0,43	14,78±0,40	68,88±0,90	74,59±1,21	23,18±0,66	7,06±0,08	192,02±6,44
Ba ²⁺	3,53±0,33	15,46±0,40	55,44±0,74	64,01±1,42	17,98±0,66	6,05±0,33	162,46±2,48
Mg ²⁺	3,02±0,47	15,79±0,33	75,94±0,84	85,68±1,16	18,48±0,52	5,54±0,47	204,46±1,53
Mn ²⁺	2,86±0,40	12,10±0,40	60,48±0,90	67,54±0,66	15,46±0,40	4,71±0,40	163,13±1,83
Cu ²⁺	3,53±0,33	15,12±0,52	59,98±0,40	67,70±0,66	19,15±0,33	6,38±0,41	171,86±1,61
Zn ²⁺	3,70±0,26	12,43±0,62	45,53±0,62	52,08±0,52	16,46±0,40	4,70±0,44	134,90±1,85
Pb ²⁺	2,69±0,31	14,11±0,96	62,50±1,34	70,22±1,53	18,48±0,52	5,38±0,46	173,38±3,74

ПРИЛОЖЕНИЕ 23

Изменения толщины тканей листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) у их основания в результате однократного действия на растения сублетальных концентраций ионов различных металлов – песчаная культура (толщина указана в мкм)

Металлы	Верхняя кутикула	Верхний эпидермис	Столбчатая паренхима	Губчатая паренхима	Нижний эпидермис	Нижняя кутикула	Сумма
Контроль	3,70±0,44	13,78±0,40	61,99±0,62	71,57±1,09	17,30±0,40	5,71±0,36	174,05±1,09
K ⁺	3,70±0,40	15,29±0,33	68,71±1,76	80,47±1,21	19,99±0,96	6,22±0,44	194,38±2,74
Na ⁺	3,53±0,33	13,44±0,52	64,01±0,68	73,92±0,59	20,66±0,42	5,71±0,30	181,27±0,96
Ca ²⁺	2,89±0,41	12,94±0,66	68,04±0,55	75,77±1,76	21±0,74	5,54±0,46	186,14±1,23
Ba ²⁺	3,02±0,47	15,44±0,42	56,28±0,51	65,52±0,52	18,98±0,49	6,55±0,62	165,82±0,84
Mg ²⁺	4,03±0,35	15,46±0,49	82,32±0,52	95,09±0,91	22,85±0,94	7,22±0,40	226,97±1,76
Mn ²⁺	2,88±0,48	13,44±0,52	61,15±1,09	70,73±0,96	16,63±0,33	4,37±0,37	169,18±0,66
Cu ²⁺	2,86±0,34	13,78±0,41	66,36±0,50	73,42±0,40	18,48±0,52	5,71±0,33	180,60±0,52
Zn ²⁺	3,53±0,33	10,58±0,40	53,42±0,66	60,14±0,99	16,97±0,62	4,87±0,33	149,52±1,16
Pb ²⁺	3,02±0,40	15,29±0,62	66,86±0,84	74,09±0,62	21,84±0,74	5,04±0,52	186,14±2,46

ПРИЛОЖЕНИЕ 24



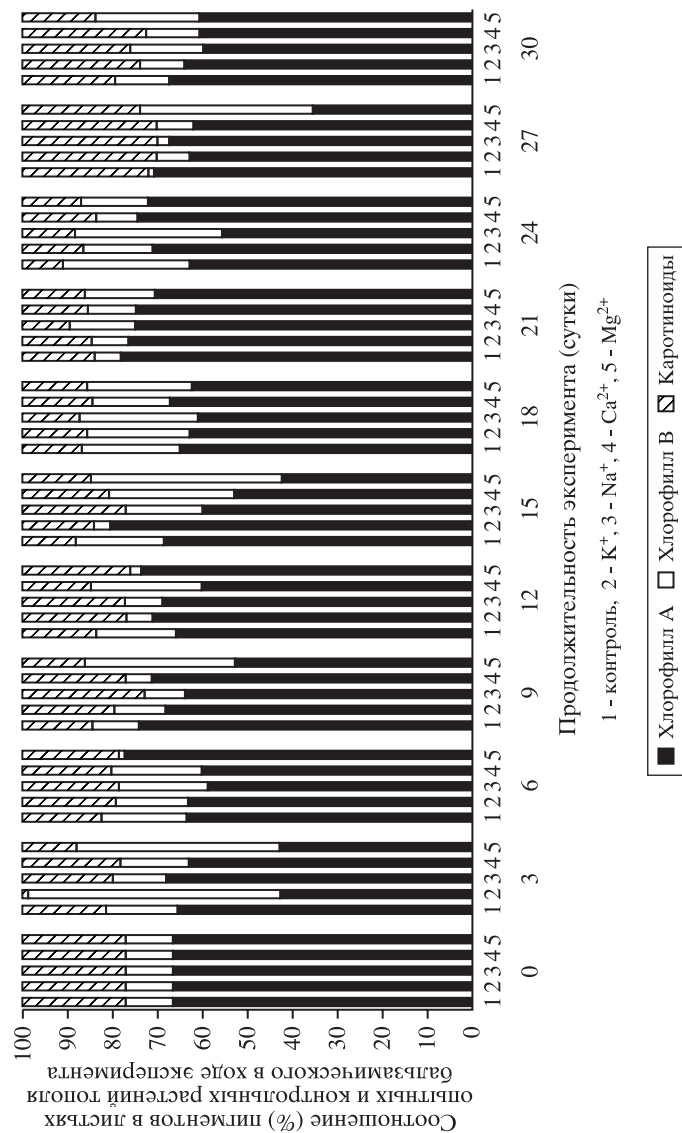
Изменения толщины листьев (мм) тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в результате однократного действия на растения сублетальных концентраций ионов различных металлов – песчаная культура

ПРИЛОЖЕНИЕ 25



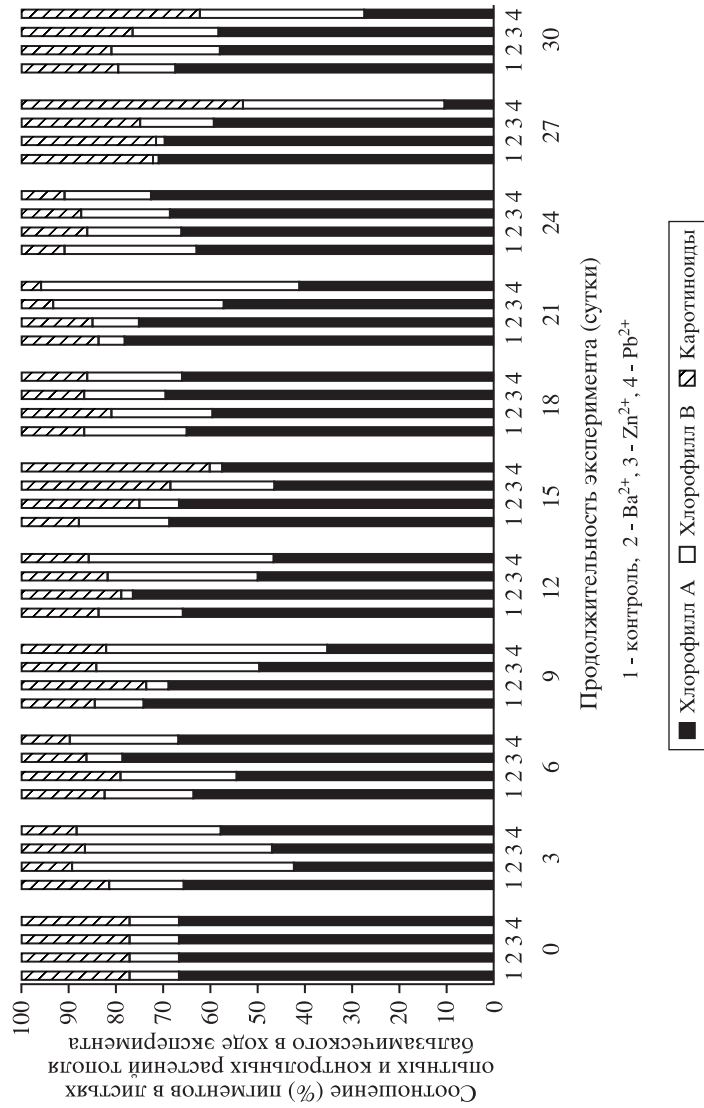
Изменения соотношения структурных компонентов листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 30-е сутки эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей металлов повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 26



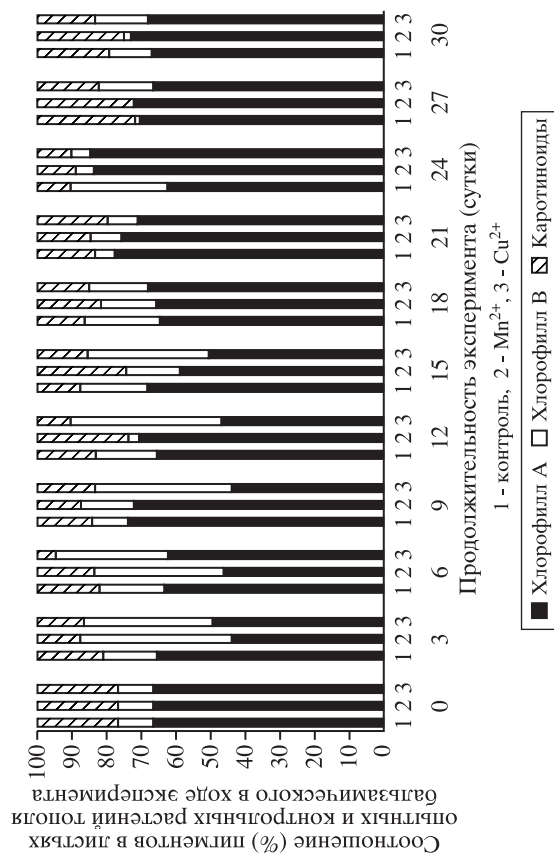
Соотношение (%) пигментов в листьях опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растительными растворами солей K^+ , Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 26 (продолжение)



Соотношение (%) пигментов в листьях опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus bal-samifera* L.) в течение эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки расте- ний растворами солей Ba^{2+} , Zn^{2+} и Pb^{2+} повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 26 (окончание)



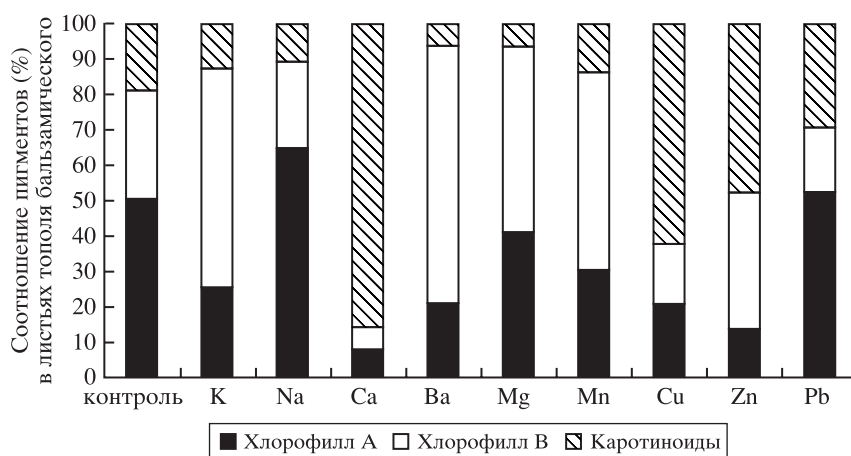
Соотношение (%) пигментов в листьях опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растительных растворами солей Mn^{2+} и Cu^{2+} повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 27

Содержание пигментов (мг/г сырой массы) в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях выращивания растений в водных растворах ацетатов металлов

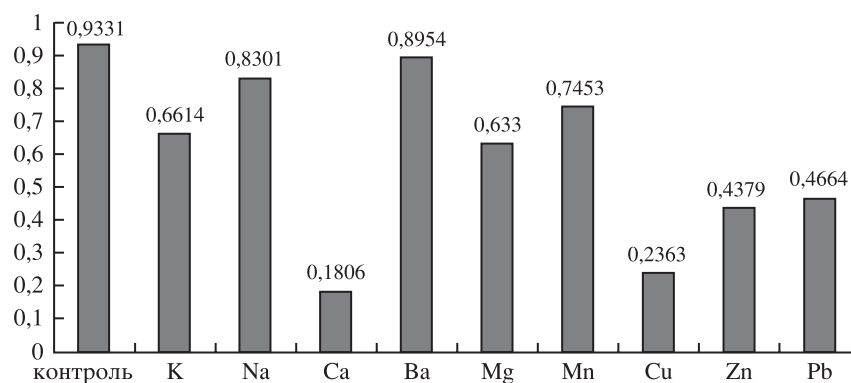
Металл	Содержание пигментов в листьях, мг/г сырой массы		
	Хлорофилл А	Хлорофилл В	Каротиноиды
Контроль	0,4726±0,0041	0,2879±0,0042	0,1726±0,0009
K	0,1682±0,0125	0,4108±0,0072	0,0824±0,0003
Na	0,5369±0,0021	0,2061±0,0154	0,0871±0,0059
Ca	0,0141±0,0034	0,0117±0,0004	0,1548±0,0091
Ba	0,1916±0,0193	0,6528±0,0102	0,0510±0,0032
Mg	0,2594±0,0131	0,3346±0,0112	0,0390±0,0013
Mn	0,2285±0,0027	0,4177±0,0020	0,0991±0,0006
Cu	0,0485±0,0040	0,0408±0,0039	0,1470±0,0008
Zn	0,0594±0,0164	0,1703±0,0659	0,2082±0,0139
Pb	0,2457±0,0035	0,0860±0,0091	0,1347±0,0179

ПРИЛОЖЕНИЕ 28



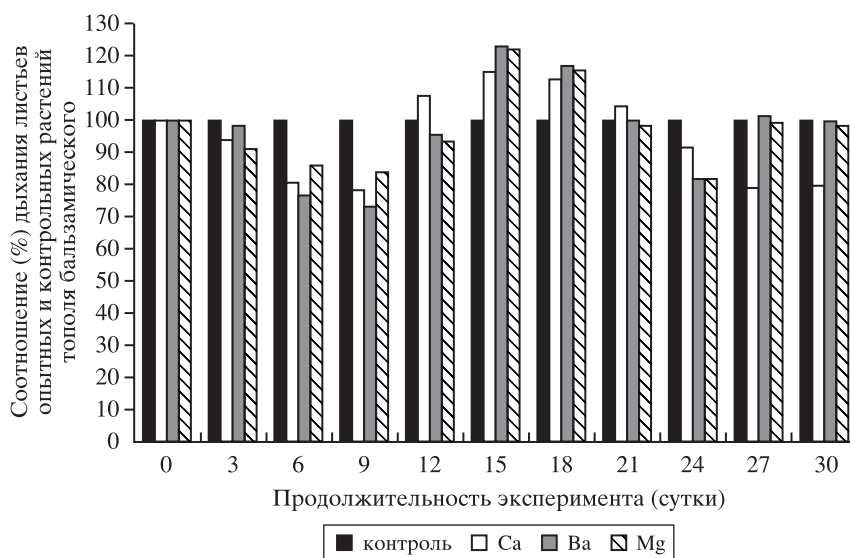
Соотношение отдельных пигментов в листьях растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 65-е сутки эксперимента, выращенных в условиях водной культуры при повышенной концентрации ионов металлов в растительном субстрате (% от общего количества пигментов в листьях)

ПРИЛОЖЕНИЕ 29



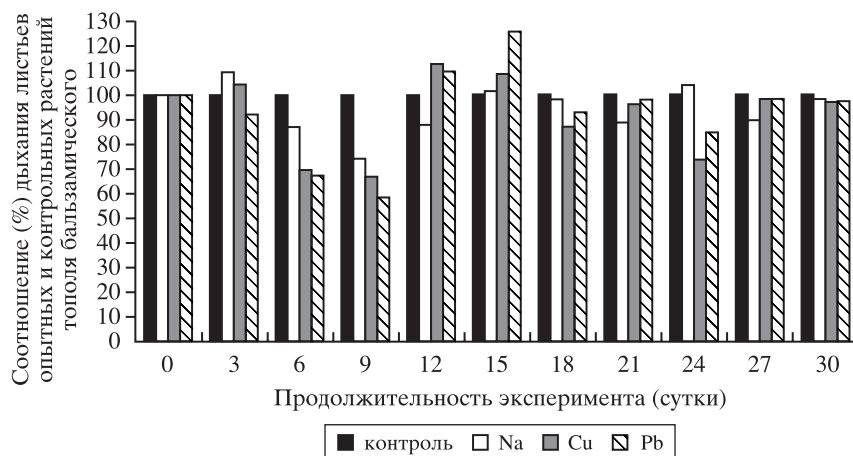
Суммарное содержание пигментов (мг/г сырой массы) в листьях растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), выращенных в условиях засоления среды ацетатами металлов – водная культура

ПРИЛОЖЕНИЕ 30



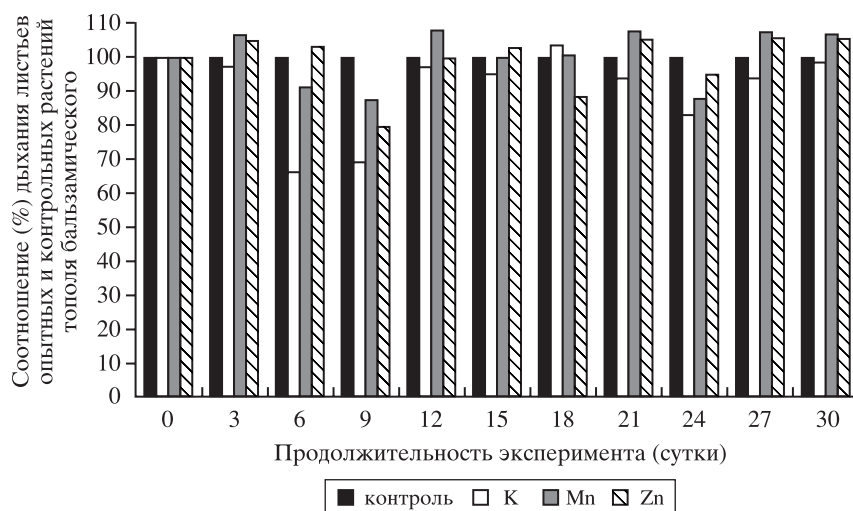
Соотношение (%) дыхания листьев опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей Ca^{2+} , Ba^{2+} и Mg^{2+} повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 30 (продолжение)



Соотношение (%) дыхания листьев опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей Na^+ , Cu^{2+} и Pb^{2+} повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 30 (окончание)



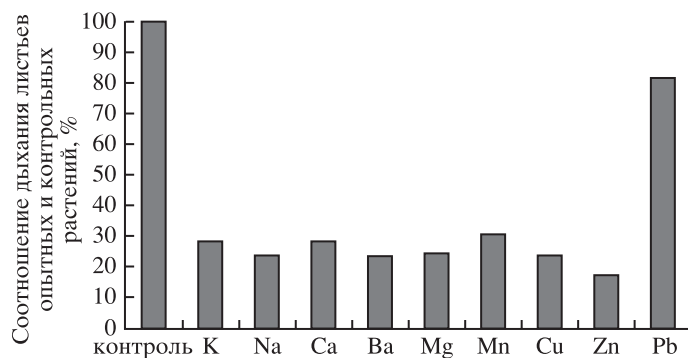
Соотношение (%) дыхания листьев опытных и контрольных растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение эксперимента, выращенных в условиях песчаной культуры после однократной обработки растений растворами солей K^+ , Mn^{2+} и Zn^{2+} повышенной концентрации

ПРИЛОЖЕНИЕ 31

Характеристика дыхания листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях выращивания растений в водных растворах ацетатов металлов

Металл	Дыхание, мкл O ₂ /г сырой массы · ч
Контроль	649,7000±22,5267
K	184,2250±12,7324
Na	152,5775±5,8892
Ca	184,1000±6,5129
Ba	149,7200±9,3561
Mg	158,6250±14,0017
Mn	197,2450±8,6801
Cu	152,7700±4,5274
Zn	111,9625±11,8142
Pb	531,9733±18,3713

ПРИЛОЖЕНИЕ 32



Дыхание листьев растений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) на 65-е сутки эксперимента, выращенных в условиях водной культуры при повышенной концентрации ионов металлов в растительном субстрате (% от дыхания листьев контрольных растений)

ПРИЛОЖЕНИЕ 33

Образец почвы *	pH		Фосфор P O ₂ ⁵ подв. мг/100 г	Азот				С орг, %		Гумус, %		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Σ
				H ₂ O ₅	KCl	N-NH ₄	N-NO ₃			Σ	Валовой			
	мг/кг													
1	7,7	6,5	0,18	3,7	0,5	4,2	840	2,06	3,55	0,084	19,8	8,3	28,1	
2	7,8	6,6	0,74	2,3	0,2	2,5	270	0,03	0,05	0,025	9,4	17,6	27,0	
3	8,0	6,9	0,98	5,2	1,9	7,1	960	5,47	9,43	0,070	23,9	17,7	41,6	
4	7,9	6,9	1,00	6,8	0	6,8	2088	1,89	3,25	0,220	32,2	14,6	46,8	
5	8,0	6,9	0,19	4,6	1,2	5,8	378	0,15	0,26	0,042	17,7	12,5	30,2	
6	8,1	7,1	0,63	1,4	1,1	2,5	270	0,11	0,19	0,046	9,4	14,5	23,9	
7	7,4	6,5	0,74	3,1	0,5	3,6	888	0,28	0,48	0,098	18,7	15,6	34,3	

*цифрами обозначены образцы почвогрунтов: 1 – почвогрунты на степном участке (0–10 см); 2 – отвальный грунт из-под лиственных Сукачева (30–40 см); 3 – почвы из-под лиственных Сукачева (0–10 см); 4 – почвы из-под березы бородавчатой (0-10 см); 5 - отвальный грунт из – под березы бородавчатой (30–40 см); 6 – отвальный грунт из – под сосны обыкновенной (30 – 40 см); 7 – почвы из – под сосны обыкновенной (30–40 см).

ПРИЛОЖЕНИЕ 34

№ раз- реза*	Горизонт и глубина отбора образца, см	рН водный	Р ₂ O ₅ , мг на 100 г подвижный	Азот общий, %	С : N	Гумус, %	мг* экв на 100 г		
							Ca ⁺⁺	Mg ⁺	H ⁺
1	0-20	5,68	2,0	0,098	53,8	7,10	35	15	7
2	Ag 0-4	7,53	3,3	0,10	33,6	5,80	31	6	0,7
	AC 5-20	7,62	3,3	—	—	1,35	25	8	0,4
3	Ag 0-1	7,45	5,2	0,14	39,5	9,54	29	10	0,6
	AC 2-20	8,02	3,1	—	—	0,31	28	9	—
4	0-20	5,24	5,0	0,11	45,8	6,70	24	6	13
5	Ag 0-7	7,35	0,5	0,11	37,3	7,07	29	11	1
	AC 8-20	7,60	2,7	0,05	43,4	3,67	29	10	—
6	0-20	7,70	0,3	—	—	2,02	25	4	—
7	A ₁ 0-7	7,86	4,0	0,06	30,6	3,10	31	6	—
	AC 8-20	7,88	8,6	0,052	11,6	1,02	35	11	—
8	0-20	7,35	0,8	0,05	36,6	3,22	29	4	—
9	0-20	7,53	3,85	0,06	16,9	1,75	25	7	—
10	0-20	7,44	6,1	0,085	13,6	2,00	30	7	—
11	A ₁ 0-4	7,30	1,9	0,05	37,9	3,27	41	16	—
	AC 5-20	7,53	2,9	0,04	33,3	2,30	33	15	—
12	0-20	7,74	1,5	—	—	1,43	16	5	—

* цифрами обозначены образцы почвогрунтов: 1, 4, 8 – почвогрунты с невыраженным морфологическим профилем и единичными травянистыми растениями (донник, мать-и-мачеха, тысячелистник); 2, 3, 5, 6, 7, 11 – молодые техногенные почвы, приуроченные к участкам сомкнутой бобово-злаково-разнотравной растительности; 9, 10, 12 – почвогрунты, формирующиеся в местообитаниях, заросших ивняком естественного происхождения.



Приложение 35. Общий вид отвалов Учалинского ГОК



Приложение 35 (продолжение). Древесная растительность на отвалах Учалинского ГОК



Приложение 35 (окончание). Древесная растительность на отвалах
Учалинского ГОК



Приложение 36. Общий вид отвалов Башкирского медно-серного комбината (г. Сибай)



Приложение 36 (окончание). Древесная растительность на отвалах Башкирского медно-серного комбината (г. Сибай)



Приложение 37. Общий вид отвалов Кумертауского бурогоугольного разреза



Приложение 37 (продолжение). Развитие древесных растений на отвалах Кумертауского бурогольного разреза)



Приложение 37 (окончание). Развитие древесных растений на отвалах Кумертауского бурогольного разреза

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
Краткая физико-географическая характеристика Предуралья, Южного Урала и Зауралья	
Объекты, методология и методы исследований	
Металлы: роль в жизни животных и растений, фитотоксичность	
Калий	
Роль калия в жизни животных и человека	
Значение калия в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания калия в окружающей среде	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием калия.....	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии калия.....	
Экофизиологические эффекты при действии калия на древесные растения	
Натрий	
Роль натрия в жизни животных и человека	
Значение натрия в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания натрия в окружающей среде	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием натрия.....	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии натрия.....	
Экофизиологические эффекты при действии натрия на древесные растения	
Кальций	
Роль кальция в жизни животных и человека	
Значение кальция в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания кальция в окружающей среде	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием кальция.....	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии кальция.....	
Экофизиологические эффекты при действии кальция на древесные растения	
Барий	
Роль бария в жизни животных и человека	
Значение бария в жизни растений	

Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания бария в окружающей среде	
Аккумуляция бария в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием бария.....	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии бария	
Экофизиологические эффекты при действии бария на древесные растения	
Марганец.....	
Роль марганца в жизни животных и человека	
Значение марганца в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания марганца в окружающей среде	
Аккумуляция марганца в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием марганца	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии марганца	
Экофизиологические эффекты при действии марганца на древесные растения	
Магний.....	
Роль магния в жизни животных и человека	
Значение магния в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания магния в окружающей среде	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием магния.....	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии магния.....	
Экофизиологические эффекты при действии магния на древесные растения	
Медь	
Роль меди в жизни животных и человека	
Значение меди в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания меди в окружающей среде	
Аккумуляция меди в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием меди	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии меди .	
Экофизиологические эффекты при действии меди на древесные растения.....	
Цинк.....	
Роль цинка в жизни животных и человека.....	
Значение цинка в жизни растений	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания цинка в окружающей среде	
Аккумуляция цинка в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием цинка	

Анатомо-морфологические особенности растений при действии цинка	
Экофизиологические эффекты при действии цинка на древесные растения	
Свинец	
Роль свинца в жизни животных и человека	
Значение свинца в жизни растений.....	
Развитие древесных растений в условиях избыточного содержания свинца в окружающей среде	
Аккумуляция свинца в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Повреждения органов древесных растений, вызванные действием свинца	
Анатомо-морфологические особенности растений при действии свинца	
Экофизиологические эффекты при действии свинца на древесные растения	
Железо.....	
Роль железа в жизни человека, животных и растений	
Аккумуляция железа в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Стронций	
Роль стронция в жизни человека, животных и растений.....	
Аккумуляция стронция в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Кадмий.....	
Роль кадмия в жизни человека, животных и растений	
Аккумуляция кадмия в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Никель.....	
Роль никеля в жизни человека, животных и растений.....	
Аккумуляция никеля в органах древесных растений и почвогрунтах в условиях техногенного загрязнения.....	
Состояние лесных насаждений техногенных ландшафтов.....	
Особенности аккумуляции металлов древесными растениями в техногенных ландшафтах	
Относительное жизненное состояние деревьев в условиях техногенного загрязнения.....	
Продуктивность древесных растений в условиях загрязнения окружающей среды металлами	
Биологическая консервация загрязнителей и адаптация древесных растений в условиях загрязнения окружающей среды металлами	
Литература	
Приложения	

Научное издание

**Кулагин Андрей Алексеевич
Шагиева Юлия Александровна**

**Древесные растения
и биологическая консервация
промышленных загрязнителей**

*Утверждено к печати
Ученым советом Института биологии
Уфимского научного центра
Российской академии наук*

Зав. редакцией *Н.А. Степанова*
Редактор *Н.М. Александрова*
Художник
Художественный редактор *Ю.И. Духовская*
Технический редактор *М.К. Зарайская*
Корректор

Подписано к печати 21.12.2004. Формат 60 × 90¹/₁₆.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная
Усл.печ.л. 12,5 + 0,5. Усл.кр.-отт. 14,5. Уч.-изд.л. 12,3
Тираж 480 экз. Тип. зак. 38
Издательство “Наука”
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.ru
Internet: www.naukaran.ru