

УДК 630\*27:630\*114.53:625.77

## ПОДБОР ДРЕВЕСНЫХ И КУСТАРНИКОВЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ, ЗАГРЯЗНЯЕМЫХ ТЕХНОГЕННЫМИ ФТОРИДАМИ

Михайлова Т.А., Шергина О.В., Калугина О.В.

ФГБУН «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»

Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, e-mail: mikh@sifibr.irk.ru

Экспериментальным путем выявлены виды древесных и кустарниковых растений, пригодные для создания зеленых насаждений на территориях, загрязняемых фторсодержащими аэровыбросами. Актуальность работы обусловлена необходимостью улучшения среды городов, где располагаются крупные предприятия, в аэровыбросах которых значительную долю составляют фториды. Для исследований использовались пленочные камеры, в которых проводилась искусственная фумигация растений фтористым водородом в течение трех месяцев, создаваемая концентрация газа составляла в среднем  $0,15 \text{ мг/м}^3$ . Устойчивость растений к HF определяли по степени повреждения листьев (по проценту некрозов) сразу после окончания фумигации и через 10 месяцев, в начале следующего вегетационного периода. Аккумуляцию фтора листьями оценивали по разнице его содержания до и после фумигации. Обнаружены большие различия у испытуемых растений по степени повреждения листьев и уровню аккумуляции фтора. Высокую устойчивость к воздействию газообразного фтора показали кизильник черноплодный, бузина кистистая, дерен белый, жимолость татарская, тополь дрожащий, рябинник рябинолистный, сирень обыкновенная, смородина альпийская, яблоня сибирская. Эти растения рекомендуется использовать для создания защитных посадок на территориях хронического воздействия фторсодержащих эмиссий. В условиях периодического влияния аэровыбросов или при слабом их воздействии рекомендуемый ассортимент гораздо шире, в том числе за счет использования видов, обладающих высокой регенерационной и аккумулирующей способностью. Наибольшая аккумуляция фтора обнаружена в листьях кизильника черноплодного (в 22 раза выше фонового уровня), тополя душистого (в 20 раз превышает фон), душевки кустарниковой (в 19 раз), бузины кистистой (в 16 раз), тополя дрожащего и спиреи средней (в 15 раз).

**Ключевые слова:** древесные и кустарниковые растения, фумигация фтористым водородом, устойчивые виды, аккумуляция фтора листьями, рекомендации по озеленению

## SELECTION OF TREES AND SHRUBS FOR PLANTING TERRITORIES POLLUTED BY TECHNOGENIC FLUORIDES

Mikhaylova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V.

Siberian Institute of Plant Physiology & Biochemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, e-mail: mikh@sifibr.irk.ru

Experimentally identified species of trees and shrubs that are suitable for creating greenery in areas polluted with fluorinated aerial outliers. The relevance of the work is due to the need to improve the environment of the cities where large enterprises are located, in the emissions of which fluorides form a significant part. For the studies, film chambers were used, in which artificial fumigation of plants with hydrogen fluoride for three months was carried out, the generated gas concentration was on average  $0.15 \text{ mg / m}^3$ . Plant resistance to HF was determined by the degree of leaf damage (by percentage of necrosis) immediately after the end of fumigation and 10 months later, at the beginning of the next vegetation period. The accumulation of fluorine by leaves was evaluated by the difference in its content before and after fumigation. Large differences were found in the test plants according to the degree of leaf damage and the level of fluorine accumulation. High resistance to the effects of gaseous fluorine was shown by *Cotoneaster melanocarpus*, *Sambucus racemosa*, *Cornus alba*, *Lonicera tatarica*, *Populus tremula*, *Sorbaria sorbifolia*, *Syringa vulgaris*, *Ribes alpinum*, *Malus pallasiana*. These plants are recommended for creating protective plantings in areas of chronic exposure to fluoride-containing emissions. Under the conditions of periodic impact of emissions or when their impact is weak, the recommended assortment is much wider, including species with a high regeneration and accumulative capacity. The greatest accumulation of fluorine was found in the leaves of the *Cotoneaster melanocarpus* (22 times higher than the background level), *Populus suaveolens* (20 times higher), *Duschekia fruticosa* (19 times), *Sambucus racemosa* (16 times), *Populus tremula* and *Spiraea media* (15 times).

**Keywords:** tree and shrub plants, fumigation with hydrogen fluoride, resistant species, accumulation of fluoride in leaves, recommendation on planting

При выполнении задачи по улучшению экологической ситуации на урбанизированных территориях и созданию комфортной среды для населения требуется решить немаловажный вопрос, связанный с увеличением площади различных типов и категорий зеленых насаждений. На территориях городов и других населенных

пунктов именно деревья и кустарники выполняют основные средообразующие и санитарно-защитные функции (выделение кислорода, поглощение загрязняющих веществ, улучшение гидротермических условий, создание комфортного микроклимата, снижение уровня шума и др.), поэтому их следует рассматривать как главнейший

компонент озеленения. При создании искусственных насаждений требуется учитывать тот факт, что в современный период большинство урбанизированных территорий испытывают значительное воздействие такого негативного фактора, как техногенное загрязнение. Поэтому выбор пород рекомендуется осуществлять, принимая во внимание их устойчивость к загрязняющим веществам и способность к их аккумуляции. Исходя из этого, необходимо выделять участки разного экологического статуса и располагать на них адекватные типы насаждений [1]. Например, при создании зеленой зоны вокруг промышленного объекта или вдоль крупных автомагистралей следует высаживать наиболее устойчивые к техногенному загрязнению виды деревьев и кустарников, обладающие также эффективной фильтрующей способностью. При этом важно учитывать уровень техногенных эмиссий, присутствие в их составе поллютантов высокотоксичных для растений и биоты в целом. Среди газообразных поллютантов наиболее агрессивны фтор- и хлорсодержащие, диоксид серы, стойкие органические загрязнители (в том числе бензпирены), аэрозоли тяжелых металлов, соответственно, для озеленения территорий, подвергающихся хроническому воздействию таких загрязняющих веществ, крайне важен целевой подбор растений, пригодных для посадок и отличающихся высокими аккумуляционными свойствами и выраженной резистентностью к доминирующим токсикантам. Однако в большинстве случаев при озеленении городских территорий и создании защитных посадок вблизи промышленных предприятий не учитывается устойчивость древесных растений к техногенному загрязнению вследствие недостатка соответствующих сведений и исследований. Например, показано, что отсутствие критического анализа при выборе ассортимента видов для городского озеленения привело к тому, что больше половины древесных и кустарниковых пород (53% списочного состава) оказались непригодными для этих целей, поскольку они относятся к категории сильно повреждающихся [2].

Регион исследования – Иркутская область (Восточная Сибирь) характеризуется высоким уровнем техногенного загрязнения воздушного бассейна большинства городов. В составе аэровыбросов постоянно присутствуют упомянутые токсиканты, причем в концентрациях, значимо превы-

шающих ПДК [3]. Особо следует выделить высокотоксичные фториды, поступающие с эмиссиями крупных алюминиевых заводов, расположенных на территории области. Проводимые нами мониторинговые исследования показывают, что загрязнение атмосферного воздуха фторидами, как газообразными, так и в составе твердого аэрозоля, не носит локального характера, то есть регистрируется не только вблизи алюминиевых заводов, но и на смежных территориях, где располагаются жилые районы городов. Например, это показано для Братска и Шелехова [4, 5]. Поэтому представляется весьма актуальным улучшение среды этих и других городов через создание эффективного защитного зеленого фонда, слагаемого из растений, наиболее устойчивых к техногенному загрязнению фтором и способных к высокой его аккумуляции.

Цель исследования: экспериментальным путем выявить виды древесных и кустарниковых растений, пригодные для создания зеленых насаждений на территориях, загрязняемых фторсодержащими аэробросами.

#### Материалы и методы исследования

Для испытания на устойчивость к фторидам было отобрано 30 видов древесных и кустарниковых растений (всего 150 экземпляров), отличающихся хорошей выживаемостью в условиях Восточной Сибири. Все растения были высажены на экспериментальный участок института за год до начала работ. За это время они хорошо укоренились и адаптировались. На следующий год в конце мая растения закрыли крупногабаритными пленочными камерами объемом 20 м<sup>3</sup> каждая, одна камера вмещала 30 растений. Искусственная фумигация растений проводилась фтористым водородом в 2013 г. в течение трех месяцев, с июня по август, его концентрация в камерах в среднем составляла 0,15 мг/м<sup>3</sup>. Газ подавался из небольшого баллона слабой струей, а для равномерного распределения HF камеры непрерывно вентилировались путем автоматической подачи чистого воздуха. Для контроля за концентрацией HF проводился отбор проб воздуха из камер аспиратором, содержание фтора в пробах определяли фотометрически. Для большей достоверности результатов концентрация газа в камерах была заведомо более высокой, чем на городских территориях, и примерно соответствовала ее уровню в рабочей зоне алюминиевого завода. Периодически, 1–2 раза в месяц, проводили

полив почвы в камерах, при ярком солнечном свете камеры затеняли белыми полотняными пологам от перегрева. Устойчивость растений к HF определяли по степени повреждения листьев, то есть по проценту некрозов на них, проявившихся сразу после окончания фумигации и через 10 месяцев, то есть в следующем году в начале вегетационного периода. К слабоповреждающимся относили растения, имеющие менее 25% хлорозов и некрозов от общей площади листьев, к среднеповреждающимся – имеющие >25–60%, к сильноповреждающимся – имеющие >60% [6]. Площадь листовой поверхности определяли по формулам, приведенным в работе А.И. Уткина с соавторами [7], а расчет площади некрозов производили с помощью статистической программы MatdCad 15 и графической Corel DRAW X8. Содержание фтора в листьях определяли до фумигации и после нее, чтобы установить способность к аккумуляции этого токсиканта разными видами испытуемых древесных растений. Определение содержания фтора в листьях проводилось спектрофотометрически при длине волны 540 нм с индикатором ксиленоловым оранжевым после сухого озонирования растительного образца и дистилляции полученной золы с водяным паром в хлорной кислоте, с использованием сернистого серебра для удаления сопутствующих примесей хлора. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с применением программы «Среда статистических вычислений R», версия 3.1.1 (2014 г.). Содержание фтора вычисляли в мг/кг сухой массы листьев (хвои), рассчитывали среднюю величину, ошибку средней (квадратичное отклонение), стандартное отклонение.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Обнаружены большие различия у растений по степени повреждения листьев и уровню аккумуляции фтора (таблица). Слабая степень повреждения листьев (менее 25%) сразу после фумигации регистрировалась у 15 видов, в то же время среди них наблюдался очень большой разброс в аккумуляции фтора – кратность превышения фонового содержания фторидов в листьях после фумигации составляла от 4 у розы морщинистой до 22 у кизильника черноплодного (таблица). Довольно высокая аккумуляция фтора зафиксирована также для ряда видов, получивших 50% повреждения, например в листьях спиреи средней она превышала фоновое значение в 15 раз, душикии кустарнико-

вой – в 19 раз, тополя душистого – в 20 раз. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии зависимости между уровнем накопления фтора в листьях и степенью их повреждения. Поэтому можно предположить, что механизмы, обеспечивающие устойчивость к фтору, у испытанных растений различаются – с одной стороны, это могут быть анатомо-морфологические особенности, препятствующие высокому накоплению токсиканта, например у дерена белого, с другой стороны, возможно, при нарастании накопления токсиканта осуществляется его нейтрализация или связывание путем физиолого-биохимических реакций, эта способность может проявляться у бузины кистистой и кизильника черноплодного.

К началу следующего вегетационного периода три вида (пузыреплодник калинолистный, крушина ломкая, крушина слабительная), обнаруживших слабое повреждение сразу после фумигации, практически полностью погибли. У семи видов после перезимовки обнаружилась гибель половины побегов (50%). Несколько видов (спирея средняя, роза иглистая, акация желтая, тополь душистый, ива козья), у которых регистрировалось среднее или сильное повреждение листьев сразу после фумигации, на следующий год практически полностью восстановились. Следует отметить, что эти виды обладают не только хорошей регенерационной способностью, но и высокой емкостью поглощения фтора. Наконец, среди испытуемых видов выделяются те, что показали сильную повреждаемость и невысокий уровень аккумуляции токсиканта – это лиственница даурская, барбарис амурский, черемуха виргинская, бересклет европейский, боярышник кроваво-красный, груша уссурийская.

Исходя из полученных данных, наиболее устойчивостью к воздействию газообразного фтора обладают кизильник черноплодный, бузина кистистая, дерен белый, жимолость татарская, тополь дрожащий, рябинник рябинолистный, сирень обыкновенная, смородина альпийская, яблоня сибирская. Эти растения рекомендуется использовать в первую очередь для создания защитных посадок, особенно на территориях хронического воздействия фторсодержащих эмиссий. В условиях периодического влияния аэровыбросов или при слабом их воздействии пригодны также виды, обладающие хорошей регенерационной способностью и высокой аккумуляцией фторидов – спирея средняя, роза иглистая, акация желтая, тополь душистый, ива козья.

Степень повреждения (процент некрозов листьев) древесных и кустарниковых пород и содержание фтора в листьях до и после фумигации фтористым водородом

Видовое название растения	Степень повреждения (%%)		Содержание фтора (мг/кг)	
	после фумигации HF	через 10 месяцев после фумигации	до фумигации	после фумигации
Лиственница даурская	70	40	23,4 ± 0,9	173,0 ± 1,1
Акация желтая	40	10	19,6 ± 0,3	171,2 ± 0,8
Барбарис амурский	70	50	28,4 ± 0,6	110,5 ± 1,9
Береза повислая	60	40	16,6 ± 0,7	162,4 ± 3,0
Бересклет европейский	50	50	15,6 ± 0,1	122,0 ± 1,1
Боярышник кроваво-красный	60	50	32,3 ± 0,3	113,0 ± 1,2
Бузина кистистая	10	некрозы отсутствуют	9,6 ± 0,1	159,6 ± 0,8
Вяз перистоветвистый	10	50	13,7 ± 0,5	148,8 ± 1,4
Груша уссурийская	70	50	27,0 ± 0,3	117,1 ± 0,4
Дерен белый	10	некрозы отсутствуют	20,8 ± 0,3	104,0 ± 2,8
Душекия кустарниковая	50	40	10,3 ± 0,8	193,1 ± 3,8
Жимолость татарская	20	некрозы отсутствуют	17,1 ± 0,3	104,7 ± 0,2
Ива козья	40	10	17,0 ± 0,2	141,3 ± 1,6
Кизильник черноплодный	20	некрозы отсутствуют	10,1 ± 0,8	224,8 ± 2,5
Клен ясенелистный	60	30	12,4 ± 0,7	91,6 ± 1,1
Крушина ломкая	25	90	8,9 ± 1,0	122,1 ± 1,8
Крушина слабительная	10	90	13,3 ± 0,6	95,2 ± 0,9
Лох серебристый	20	50	15,9 ± 0,1	75,4 ± 2,1
Осина (Тополь дрожащий)	20	некрозы отсутствуют	12,6 ± 0,5	193,0 ± 0,7
Пузыреплодник калинолистный	20	90	15,8 ± 0,3	97,3 ± 0,9
Роза иглистая	60	10	20,0 ± 0,4	173,5 ± 1,9
Роза морщинистая	10	50	20,6 ± 0,4	81,8 ± 0,8
Роза сизая	40	30	28,1 ± 0,3	143,6 ± 0,7
Рябинник рябинолистный	20	некрозы отсутствуют	12,9 ± 0,6	125,7 ± 4,1
Сирень обыкновенная	20	некрозы отсутствуют	13,1 ± 0,7	145,5 ± 4,1
Смородина альпийская	20	некрозы отсутствуют	23,6 ± 1,1	143,1 ± 0,8
Спирея средняя	50	10	13,6 ± 0,4	203,4 ± 2,3
Тополь душистый	50	10	9,6 ± 0,4	191,7 ± 1,6
Черемуха виргинская	60	80	21,3 ± 0,7	137,5 ± 0,7
Яблоня сибирская	20	некрозы отсутствуют	16,0 ± 0,5	142,8 ± 1,6

В лесопарках, внутриаллейных посадках под защитой насаждений из перечисленных видов можно использовать для создания «зеленого фитофильтра» и другие виды – березу повислую, душекию кустарниковую, клен ясенелистный, лох серебристый, лиственницу даурскую, многие из которых показывают повышенную аккумулирующую способность в отношении фторидов.

Полученные нами в модельном эксперименте результаты сравнивались с рекомендациями других авторов по подбору древесных растений, устойчивых к атмосферному загрязнению. Следует отметить, что большинство авторов, приводящих ассортименты устойчивых растений, не указывают, каким образом они были выделены. В ряде случаев подобные рекомендации разрабатываются на основе оценки измене-

ния морфологических параметров городских растений и уровня загрязняющих веществ в их листьях [8]. Наиболее подробная характеристика устойчивости разных видов к атмосферному загрязнению приводится для г. Москвы [9]. Несмотря на значительные различия природных условий и разные подходы к исследованию устойчивости растений, выявляется ряд совпадений между нашими результатами и данными этого автора, к устойчивым отнесены кизильник, бузина, яблоня сибирская. Однако много и не совпадающих моментов, что связано с целым рядом причин. Во-первых, с видовыми различиями, когда рекомендуются разные виды одного семейства, например бересклет Маака отнесен к устойчивым [9], а бересклет европейский по нашим данным – сильно повреждаемый вид; похожие



данные и относительно пузыреплодника калинолистного. Во-вторых, для выявления устойчивости растений в эксперименте нами создавались заведомо более жесткие условия (использование сильного токсиканта в высокой концентрации), чем те, что наблюдаются в среде городов, даже с большим объемом выбросов автотранспорта. Наконец, рекомендуемые ассортименты весьма существенно отличались по выбору видов, так, в «московском» списке отсутствует сирень обыкновенная, в то время как нами она отнесена к устойчивому виду. Учитывая, что фтористый водород является наиболее фитотоксичным поллютантом, рекомендуемый нами ассортимент древесных растений можно применять не только на территориях, загрязняемых фторидами, но и при загрязнении воздуха другими токсикантами (диоксидом серы, хлором, аэрозолями тяжелых металлов).

### Заключение

В модельном эксперименте, имитирующем воздействие аэротехногенного газообразного фтора (в виде фтористого водорода), выявлены виды древесных и кустарниковых растений с разной степенью устойчивости к этому токсиканту и с разной способностью аккумуляции его в ассимиляционных органах. Судя по полученным данным, из 30 испытанных видов наибольшей устойчивостью к воздействию газообразного фтора обладают кизильник черноплодный, бузина кистистая, дерен белый, жимолость татарская, тополь дрожащий, рябинник рябинолистный, сирень обыкновенная, смородина альпийская, яблоня сибирская. Эти растения рекомендуется использовать для создания защитных посадок на территориях хронического воздействия фторсодержащих эмиссий. В условиях периодического влияния аэровыбросов или при слабом их воздействии вдобавок к перечисленным можно высаживать виды, обладающие хорошей регенерационной способностью и высокой аккумуляцией фторидов – это спирея средняя, роза иглистая, акация желтая, тополь душистый, ива козья. В лесопарках, внутриаллейных посадках под защитой насаждений из вышеуказанных видов можно использовать для создания «зеленого фитофильтра» и другие деревья и кустарники – березу повислую, душекию кустарниковую, клен ясе-

нелистный, лох серебристый, лиственницу даурскую, многие из которых показывают повышенную аккумулялирующую способность в отношении фторидов. Наибольшая аккумуляция фтора обнаружена в листьях кизильника черноплодного, тополя душистого, душекии кустарниковой, бузины кистистой, тополя дрожащего и спиреи средней, где содержание фтора превышает фоновый уровень от 15 до 22 раз.

### Список литературы / References

1. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Экологические критерии для расчета площади зеленых насаждений в промышленных городах // *Успехи современного естествознания*. 2015. № 6. С. 123–128.
2. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Ecological criteria for calculation green plantations area within industrial cities // *Advances in current natural sciences*. 2015. № 6. P. 123–128 (in Russian).
3. Шихова Н.С., Полякова Е.В. Деревья и кустарники в озеленении города Владивостока. Владивосток: Дальнаука, 2006. 236 с.
4. Shikhova N.S., Polyakova E.V. Trees and shrubs in the landscaping of the city of Vladivostok. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. 236 p. (in Russian).
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2016 году». Иркутск: ООО Мегапринт, 2017. 274 с.
6. State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2016». Irkutsk: ООО Megaprint, 2017. 274 p. (in Russian).
7. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Шергина О.В. Phytomonitoring of technogenic fluorides in Baikal region. *Fluorine notes*. 2011. vol. 3. no. 76. P. 5–6.
8. Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. Pinus sylvestris as a bio-indicator of territory pollution from aluminum smelter emissions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. vol. 24. no. 11. P. 10279–10291. DOI: 10.1007/s11356-017-8674-5.
9. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, 2010. UNECE, ICP Forests Programme Coordinating Centre. Hamburg. URL: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (date of access: 17.10.2018).
10. Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 292 с.
11. Utkin A.I., Yermolova L.S., Utkina I.A. Surface area of forest plants: the essence, parameters, use. М.: Nauka, 2008. 292 p. (in Russian).
12. Лыкшитова Л.С., Ловцова Н.М. Морфологическая адаптация деревьев и кустарников к загрязнению атмосферного воздуха г. Улан-Удэ // *Вестник Бурятского государственного университета. Биология, География*. 2014. № 4 (1). С. 51–54.
13. Lykshitova L.S., Lovtsova N.M. Morphological adaptation of trees and shrubs to atmosphere and air pollution in Ulan-Ude // *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, Geografiya*. 2014. №. 4 (1). P. 51–54 (in Russian).
14. Кочарян К.С. Эколого-экспериментальные основы зеленого строительства в крупных городах Центральной части России (на примере Москвы). М.: Наука, 2000. 184 с.
15. Kocharyan K.S. Ecological and experimental foundations of green construction in large cities of the central part of Russia (on the example of Moscow). М.: Nauka, 2000. 184 p. (in Russian).