

УДК 581.52:581.192

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ (*CHAMAENERION ANGUSTIFOLIUM* И *TANACETUM VULGARE*) ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ФТОРСОДЕРЖАЩИМИ ВЫБРОСАМИ

© О.В. Калугина\*, Т.А. Михайлова, О.В. Шергина

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,  
Лермонтова, 132, Иркутск, 664033 (Россия), e-mail: kalugina@sifibr.irk.ru

Выявлены особенности накопления фторидов двумя видами травянистых растений – *Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub и *Tanacetum vulgare* L., произрастающих на разном удалении от алюминиевого завода, расположенного в Байкальском регионе. Наибольшее содержание фтора зарегистрировано на расстоянии 3 км от завода: в кипрее узколистном – 438 мг/кг сухой массы, в пижме обыкновенной – 306 мг/кг. По уровню накопления фтора органы *C. angustifolium* располагаются в следующем порядке (по мере убывания концентрации): листья > корни > стебли ≥ цветки, для *T. vulgare* характерна другая последовательность: корни > листья > цветки ≥ стебли. Расчет коэффициента корневого барьера для разных органов *C. angustifolium* и *T. vulgare* свидетельствует о существовании барьерных механизмов, препятствующих поступлению фтора из почвы в надземную часть растений. Особенностью накопления фтора в листьях *C. angustifolium* является его активное фоллиарное поглощение и безбарьерное поступление из почвы. Установлено, что интенсивность накопления фтора репродуктивными органами гораздо ниже, чем ассимиляционными органами. Полученные данные позволяют рекомендовать для мониторинга загрязнения фторидами атмосферного воздуха *C. angustifolium*, почвенного загрязнения – *T. vulgare*.

Ключевые слова: *Chamaenerion angustifolium*, *Tanacetum vulgare*, надземные органы, подземные органы, фтористые соединения, алюминиевый завод.

### Введение

Проблема загрязнения окружающей среды техногенными соединениями фтора актуальна для многих промышленно развитых регионов нашей страны. Самыми мощными источниками фторидов являются предприятия алюминиевой промышленности [1]. Кроме того, фторсодержащие соединения выбрасываются в атмосферу заводами минеральных удобрений, керамики и стекла [2, 3]. Высокоагрессивные фториды, поступающие в составе эмиссий, оказывают неблагоприятное воздействие на компоненты природной среды и здоровье населения [4–7].

Загрязнение атмосферного воздуха фторсодержащими соединениями определяет необходимость мониторинга поллютантов методами, основанными на современных технологиях. Применение физических, физико-химических, химических методов недостаточно, поскольку они указывают только на содержание отдельных загрязнителей, в частности фторидов, в среде и не характеризуют качество среды, ее пригодность для обитания живых организмов [8]. Мониторинг снежного покрова отражает загрязнение атмосферы лишь в зимний период (100–120 дней в году) [9]. Методы математического моделирования

процессов пространственного переноса поллютантов от источников загрязнения и методы расчета их концентраций не всегда дают адекватные результаты, совпадающие с данными прямых измерений. В то же время использование методов биологического мониторинга позволяет получить информацию о кратковременном и о длительном (хроническом) воздействии техногенных выбро-

---

Калугина Ольга Владимировна – старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, e-mail: olignat32@inbox.ru

Михайлова Татьяна Алексеевна – заведующая лабораторией природных и антропогенных экосистем, доктор биологических наук, e-mail: mikh@sifibr.irk.ru

Шергина Ольга Владимировна – старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, e-mail: sherolga80@mail.ru

\* Автор, с которым следует вести переписку.

сов, а также оценить негативный эффект загрязнения для биоты. Кроме того, применение биологических индикаторов, в частности фитоиндикаторов, дает возможность проведения исследований в региональном масштабе, определения направлений и дальности распространения загрязненных воздушных масс, уровня загрязнения, а при необходимости – произвести картирование этой территории по степени загрязнения [6, 10]. Фитоиндикационный метод с использованием травянистых растений широко применяется для выявления металлогенических провинций и поиска полезных ископаемых [11].

Основным критерием при выборе фитоиндикаторов для мониторинга является высокая чувствительность организма к воздействию техногенных поллютантов [12]. Фитоиндикаторы должны быть повсеместно распространены на изучаемой территории, иметь четко выраженную количественную и качественную реакцию на изменение окружающей среды, кроме того, биология вида-индикатора должна быть хорошо изучена. Учитывая это, в качестве биоиндикаторов предпочтительнее использовать растительные организмы (продуценты), поскольку они обладают высокочувствительным к любым воздействиям фотосинтетическим аппаратом, которого нет у консументов и редуцентов [13].

В растениях на фоновых (незагрязненных) территориях фтор содержится в очень низких концентрациях. Природными источниками этого элемента являются почвообразующие породы, вулканические газы и термальные воды [14]. По данным одних исследователей, естественные концентрации фтора в листьях растений составляют 1–10 мг/кг [15–17], согласно другим источникам, они не превышают 30 мг/кг [18, 19]. В ассимиляционных органах хвойных деревьев на фоновых территориях уровень фтора составляет 8–20 мг/кг, отмирание хвои наступает при содержании в ней фтора, превышающем 100 мг/кг [20].

В условиях техногенного загрязнения основным путем поступления фтора и его соединений в организм растений является поглощение аэральным путем через кутикулу листьев и устьица. Кроме того, фториды могут поступать в растение и через корневую систему, что наблюдается преимущественно на очень загрязненных почвах на расстоянии 3–5 км от крупных техногенных источников фторсодержащих выбросов [20, 21]. Обнаружено, что поглощение фтора корневой системой увеличивается на очень кислых почвах [22].

Разные виды растений обладают неодинаковой способностью к накоплению фтора. Рекордсменом считается чай (*Camellia sinensis*), его листья могут накапливать до 4000 мг/кг [23]. Из травянистых растений сильными аккумуляторами фтора считаются *Baccharis dracunculifolia* и *Bidens pilosa*, уровень фтора в этих растениях может достигать 1500 и 1200 мг/кг соответственно [5]. В то же время *Gladiolus*, *Lolium*, *Freesia*, *Tulipa*, *Narcissus*, *Convallaria*, *Ipomoea*, *Hedychium*, *Borreria* очень чувствительны даже к небольшому повышению уровня фтора в окружающей среде [5, 24]. Из древесных растений наиболее чувствительны к фторидам хвойные породы – *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, *Picea obovata*, они обладают на порядок меньшей устойчивостью к фтору в сравнении с лиственными породами – *Populus laurifolia*, *Betula pendula* [20]. Многие исследователи указывают на неравномерное распределение фтора по органам растений: *Agrimonia eupatoria*, *Plantago major*, *Polygonum aviculare* аккумулируют его в корнях, тогда как *Echium vulgare*, *Astragalus glycyphyllos*, *Trifolium arvense* в надземной части [3]. В сельскохозяйственных видах растений, фтор в основном накапливается в зеленой массе, меньше в корнях и плодах [25].

Ранее нами при исследовании загрязнения лесных экосистем Байкальского региона в качестве биоиндикатора использовалась сосна обыкновенная как основная лесообразующая порода, обладающая высокой чувствительностью к атмосферному загрязнению [5, 20]. В то же время возрастает актуальность исследований аккумуляции фторидов травянистыми растениями, часто являющимися эдикаторами на антропогенно нарушенных территориях, в частности, в местах вырубок, на гарях и залежных землях, где древостои могут отсутствовать. Площадь таких участков, прилегающих к промышленным объектам, в том числе к алюминиевым заводам, возрастает с каждым годом [27]. Исходя из изложенного, целью данной работы было изучить особенности накопления фторидов наиболее распространенными в регионе травянистыми растениями (*Chamaenerion angustifolium* и *Tanacetum vulgare*) и показать возможность использования их для мониторинга пространственного загрязнения наземных экосистем эмиссиями алюминиевых заводов.

### **Объекты и методы**

Исследования проводились в Иркутской области в окрестностях Иркутского алюминиевого завода (ИрАЗ), являющегося мощным предприятием цветной металлургии с производительностью более 400 тыс. т алюминия в год. Ежегодный объем аэровыбросов ИрАЗа составляет 25 тыс. т загрязняющих веществ, включая фторсодержащие соединения [27].

Объектами исследования служили многолетние травянистые растения: кипрей узколистный *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. из семейства кипрейные (Onagraceae) и пижма обыкновенная *Tanacetum vulgare* L. из семейства Астровые (Asteraceae), имеющие хорошо развитую корневую систему, с множеством мелких корешков, основная масса которых располагается в почве на глубине до 40 см. Помимо широкого распространения в регионе эти растения активно используются также в качестве лекарственного сырья в фитотерапии и кормового объекта в сельском хозяйстве. Целые растения собирали на пробных площадях, расположенных на разном удалении от ИркАЗа – 3, 10, 20 км по преобладающему направлению переноса аэровыбросов. На каждой пробной площади закладывали 20 учетных площадок размером 1×1 м по регулярному принципу, на них выкапывали растения кипрея и пижмы [28]. Фоновой служила пробная площадь, находящаяся в 25 км в юго-западном направлении от завода и не подпадающая под основной перенос промышленных эмиссий. На всех площадях производился также отбор образцов почвы из верхних дерновых (Ad) и гумусово-аккумулятивных (А) горизонтов. При полевом обследовании мощность дерновых горизонтов составила 0–15 см, гумусово-аккумулятивных – 16–40 см. В соответствии с классификацией и номенклатурой почв Иркутской области, тип почвы на всех площадках – серая лесная среднемощная [29].

В лабораторных условиях растения разделяли на отдельные органы (корни, стебли, листья, цветки), корни тщательно очищали от видимых примесей, промывали вначале в проточной, затем – в дистиллированной воде. После промывки образцы высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре в течение двух недель, а затем измельчали до порошкообразного состояния с использованием мельницы Braun (Германия) и просеивали через сито с диаметром отверстий 0.5 мм. Почвенные образцы также высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре в течение двух недель, после чего измельчали в фарфоровых ступках и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Определение влажности растительных и почвенных образцов проводили в 3-кратной повторности после их высушивания в сушильном шкафу до постоянного веса при температуре 60 °С. Содержание фтора в органах растений и почвенных образцах определяли спектрофотометрически (на ПЭ-5400ВИ) при длине волны 540 нм с индикатором ксиленоловым оранжевым после сухого озоления пробы и дистилляции полученной золы с водяным паром в хлорной кислоте. Для удаления сопутствующих примесей хлора в растворе использовали сернистое серебро. Для определения водорастворимой (доступной) формы фтора в почве использовали стандартную водную вытяжку. Этот показатель позволяет судить об обеспеченности травянистых растений соединениями фтора.

Для оценки уровня накопления фтора в растениях рассчитывали коэффициент концентрации – отношение содержания фтора в исследуемом объекте к фоновому содержанию [30]. На основании данных показателя  $K_c$  судили об уровне загрязнения растений фторсодержащими эмиссиями, значения  $K_c < 1.1$  соответствуют фоновому (природному) уровню фтора в растениях,  $K_c$  равное 1.2–1.4 – слабому,  $K_c$  равное 1.5–1.9 – среднему,  $K_c \geq 2$  – высокому уровню загрязнения [31]. Интенсивность накопления фтора растениями вычисляли с использованием коэффициента корневого барьера ( $K_{кб}$ ) – соотношение содержания фтора в корнях растений и надземных органах [32]. Для статистической обработки полученных данных использовали компьютерную программу «Среда статистических вычислений R», версия 3.1.1 (2014 г.). На рисунках и в таблицах приведены средние величины каждого параметра и их стандартные отклонения. Обсуждены различия, достоверные при  $P \leq 0.05$ .

### Результаты и обсуждение

При определении содержания фтора в растениях в целом обнаружено, что наиболее высокая концентрация этого элемента, равная 437,94 мг/кг сухой массы, отмечается в кипрее на расстоянии до 3 км от ИркАЗа (рис. 1).

По мере удаления от завода содержание фтора снижается, однако в 20 км оно остается выше фоновых значений на 35%. В пижме по мере приближения к ИркАЗу концентрация фтора возрастает менее значимо, наибольший уровень этого элемента (306 мг/кг сухой массы) выявляется также на удалении до 3 км, на расстоянии 10 и 20 км, он выше фонового на 76 и 34% соответственно. На фоновой территории уровень фтора в кипрее составляет 157 мг/кг сухой массы, а в пижме – 127 мг/кг. При расчете коэффициентов концентрации ( $K_c$ ) показано, что на удалении 20 км значения  $K_c$  для кипрея 1.4 и пижмы 1.3 соответствуют слабому уровню их загрязнения, на удалении 10 км  $K_c$  равны, соответственно, 1.9 и 1.8 – среднему уровню, на удалении 3 км  $K_c$  2.8 и 2.4 – высокому уровню.

Если рассчитывать процентное содержание фтора в надземной и подземной частях растений, то выявляется, что *C. angustifolium* значительно большую часть фтора аккумулирует в надземных органах, в то

время как в *T. vulgare* отмечается практически равное распределение фтора между надземными и подземными органами (рис. 2). Кроме того, определялось содержание фтора в разных органах исследуемых травянистых растений (рис. 3). Выявлено, что в 3 км от ИркаЗа концентрация фтора высока во всех органах кипрея и превышает фоновый уровень в листьях, стеблях, корнях в 3 раза, в цветках – в 2.4 раза. При удалении от завода концентрация фторидов в органах кипрея снижается, но остается выше фоновой даже на расстоянии 20 км. По накоплению фтора органы кипрея можно расположить в следующем порядке (по убыванию концентрации): листья > корни > стебли ≥ цветки. Наибольший уровень фторидов в ассимиляционных органах кипрея подтверждается также более высоким (в сравнении с пижмой) коэффициентом корреляции ( $r$ ) между содержанием их в атмосферных выбросах завода и в листьях (табл. 1). Следовательно, можно говорить о значительном фолитарном поглощении фтора ассимиляционными органами кипрея.

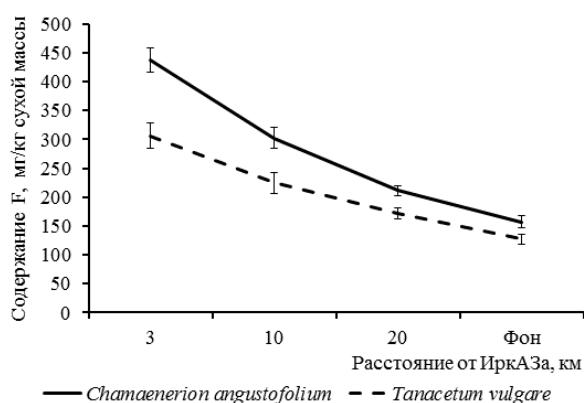


Рис. 1. Общее содержание фтора в травянистых растениях на разном удалении от алюминиевого завода

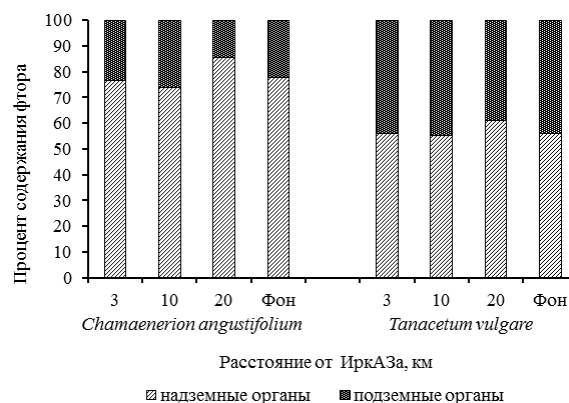


Рис. 2. Процент содержания фтора в надземной и подземной части растений на разном удалении от алюминиевого завода

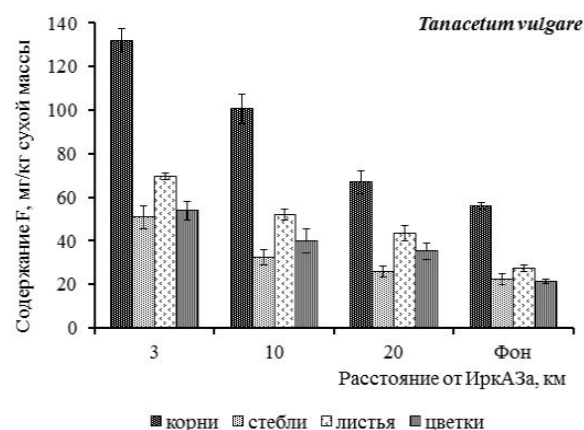
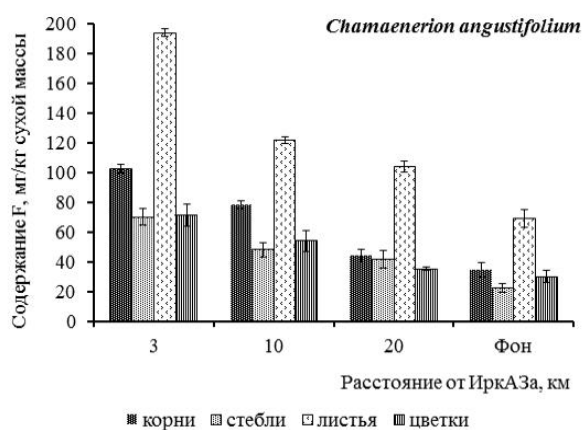


Рис. 3. Содержание фтора в разных органах травянистых растений на разном удалении от алюминиевого завода

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между концентрацией фторидов в эмиссиях ИркаЗа и их накоплением в надземных органах травянистых растений ( $P = 0.05$ ,  $n = 12-15$ )

Компоненты выбросов	<i>Chamaenerion angustifolium</i>			<i>Tanacetum vulgare</i>		
	листья	стебли	цветки	листья	стебли	цветки
Общее количество выбросов	0.90	0.75	0.66	0.71	0.69	0.63
Фтористый водород	0.94	0.87	0.74	0.70	0.68	0.68
Твердые фториды	0.77	0.56	0.51	0.69	0.78	0.61

Самые высокие концентрации фтора во всех органах пижмы обнаруживаются также на удалении 3 км от завода, по сравнению с фоновым содержанием они выше в 2.3–2.5 раза. На большем удалении от завода уровень фтора в органах *T. vulgare* снижается, однако даже в 20 км остается выше фонового в 1.2–1.7 раза. По уровню накопления фтора органы пижмы можно расположить в следующем порядке: корни > листья > цветки ≥ стебли. Таким образом, больший уровень фтора регистрируется в корнях пижмы, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции между накоплением водорастворимых (доступных) форм фторидов в верхних горизонтах почв (рис. 4) и подземных органах этого растения ( $r$  для горизонта Ad = 0.92,  $r$  для горизонта A = 0.89;  $P = 0.05$ ,  $n = 12-15$ ).

При исследовании поступления фтора из почвы и его распределения между корнями и надземными частями растений определялся коэффициент корневого барьера –  $K_{кб}$  (табл. 2). Значения коэффициента выше единицы указывают на наличие физиологического барьера при поступлении в надземную часть растений. Наши расчеты показали, что наиболее высокие значения  $K_{кб}$  характерны для репродуктивных органов обоих видов, а также стеблей, выполняющих в основном транспортную функцию. Коэффициент корневого барьера для листьев *T. vulgare* также выше единицы, что указывает на наличие защитных механизмов при поступлении фтора из почвы. Кроме того, обращает на себя внимание низкий  $K_{кб}$  (0.43–0.64) для ассимиляционных органов кипрея узколистного, что свидетельствует об отсутствии барьеров на пути поступления фтора из почвы. Таким образом, листья *C. angustifolium* аккумулируют наибольшее количество фтора как в результате активного фолитарного поглощения его соединений, так и беспрепятственного поступления фторидов из почвы.

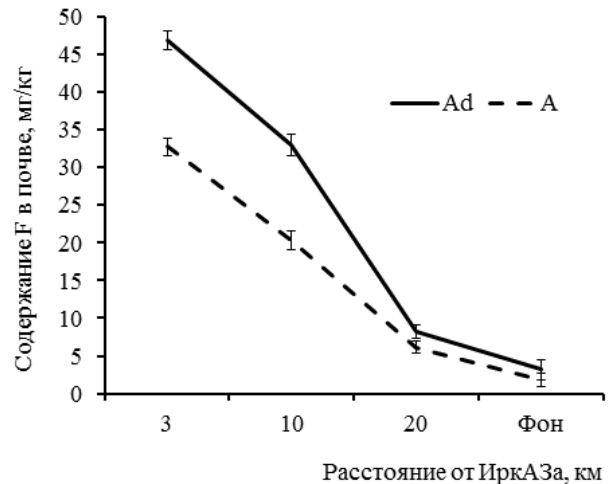


Рис. 4. Содержание водорастворимого фтора в верхних горизонтах (Ad и A) почв на разном удалении от алюминиевого завода

Таблица 2. Коэффициент корневого барьера ( $K_{кб}$ ) в надземных и подземных органах растений на разном удалении от алюминиевого завода

Расстояние от алюминиевого завода	Вид растения	Орган растения	$K_{кб}$
3 км	<i>C. angustifolium</i>	листья	0.53
		стебли	1.46
		цветки	1.44
	<i>T. vulgare</i>	листья	1.90
		стебли	2.61
		цветки	2.45
10 км	<i>C. angustifolium</i>	листья	0.64
		стебли	1.63
		цветки	1.45
	<i>T. vulgare</i>	листья	1.94
		стебли	3.10
		цветки	2.51
20 км	<i>C. angustifolium</i>	листья	0.43
		стебли	1.07
		цветки	1.26
	<i>T. vulgare</i>	листья	1.54
		стебли	2.61
		цветки	1.90

### Заключение

Исследовано накопление фтора двумя видами травянистых растений *Chamaenerion angustifolium* и *Tanacetum vulgare*, произрастающих на разном расстоянии от крупного алюминиевого завода (ИрКАЗа), расположенного в Байкальском регионе. Обнаружено, что кипрей узколистный в целом аккумулирует фтора больше, чем пижма обыкновенная. При этом показано, что основным депонирующим фтор органом у *C. angustifolium* являются листья, *T. vulgare* более активно поглощает этот элемент корнями. Наименьшие концентрации фтора у обоих видов травянистых растений обнаруживаются в стеблях и цветках. Рассчитанный коэффициент корневого барьера для разных органов исследованных растений свидетельствует о наличии барьерных механизмов, препятствующих поступлению фтора из почвы в надземные органы, что наиболее выражено для пижмы. Особенностью накопления фтора в листьях кипрея является активное его фолиарное поглощение и безбарьерное поступление из почвы. Выявлено также, что интенсивность поглощения фтора репродуктивными органами обоих видов ниже, чем ассимиляционными органами. Данная закономерность, вероятно, обуславливается наличием физиологических барьеров, регулирующих накопление и распределение элемента между корнями и надземными органами. Полученные данные позволяют рекомендовать для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха фторсодержащими эмиссиями *C. angustifolium*, а *T. vulgare* – для мониторинга загрязнения почвы фторидами.

### Список литературы

1. Куликов Б.П., Сторожев Ю.И. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами. Красноярск, 2012. 268 с.
2. Окорков В.В., Абдрахманов М.П. Содержание фтора в почве и растениях при применении средств химизации в степной зоне Казахстана // Агрехимия. 1994. №4. С. 85–95.
3. Костышин С.С., Перепелица О.О., Сметанюк О.И. Особенности накопления фторидов в растениях луговых биотопов Северной Буковины // Сибирский экологический журнал. 2011. №6. С. 843–849.
4. Пашова В.Т. Содержание фтора в почве и растениях // Агрехимия. 1980. №10. С. 165–171.
5. Divan Junior A.M., Oliva M.A., Ferreira F.A. Dispersal pattern of airborne emissions from an aluminium smelter in Ouro Preto, Brazil, as expressed by foliar fluoride accumulation in eight plant species // Ecological indicators. 2008. Vol. 8. Pp. 454–461. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.04.008.
6. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Шергина О.В. Фитомониторинг атмосферного загрязнения в Байкальском регионе // Сибирский экологический журнал. 2013. №5. С. 725–731.
7. Martin S.C., Lariviere C. Community health risk assessment of primary aluminum smelter emissions // JOEM. 2014. Vol. 56, N5S. Pp. 33–39. DOI: 10.1097/JOM.0000000000000135.
8. Мандра Ю.А. Растения как индикаторы экологического состояния среды курортного региона: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2010. 22 с.
9. Горшков А.Г., Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Верещагин А.Л. Хвоя сосны как тест-объект для оценки распространения органических поллютантов в региональном масштабе // Доклады Академии наук. 2006. Т. 48, №2. С. 247–249.
10. Dmuchowski W., Gozdowski D., Baczewska A.N. Comparison of four bioindication methods for assessing the degree of environmental lead and cadmium pollution // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 197. Pp. 109–118. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.09.062.
11. Брукс Р.Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых. М., 1986. 312 с.
12. Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев, 1978. 246 с.
13. Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М., 1998. 193 с.
14. Halmer M.M., Schmincke H.U., Graf H.F. The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2002. Vol. 115. Pp. 511–528. DOI: 10.1016/S0377-0273(01)00318-3.
15. Arnesen A.K.M. Availability of fluoride to plants grown in contaminated soils // Plant Soil. 1997. Vol. 191. Pp. 13–25. DOI: 10.1023/A:1004210713596.
16. Vike E. Air-pollutant dispersal patterns and vegetation damage in the vicinity of three aluminium smelters in Norway // The Science of the Total Environ. 1999. Vol. 236. Pp. 75–901. DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00268-5.
17. Zuo H., Chen L., Kong M., Qiu L., Lü P., Wu P., Yang Y., Chen K. Toxic effects of fluoride on organisms // Life Sciences. 2018. Vol. 198. Pp. 18–24. DOI: 10.1016/j.lfs.2018.02.001.
18. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / под ред. Ю.Е. Саета. М., 1989. 439 с.
19. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск, 2001. 229 с.
20. Рожков А.С., Михайлова Т.А. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья. Новосибирск, 1989. 160 с.

21. Arnesen A.K.M., Abrahamsen G., Sandvik G., Krogstad T. Aluminium-smelters and fluoride pollution of soil and soil solution in Norway // *The Science of the Total Environment*. 1995. Vol. 163. Pp. 39–53. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04479-K.
22. Treshow M., Anderson F.K. *Plant Stress from Air Pollution*. John Wiley, Chichester, 1989. 283 p.
23. Xie Z.M., Ye Z.H., Wong M.H. Distribution characteristics of fluoride and aluminum in soil profiles of an abandoned tea plantation and their uptake by six woody species // *Environment International*. 2001. Vol. 26, I. 5-6. Pp. 341–346. DOI: 10.1016/S0160-4120(01)00010-1.
24. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск, 1979. 278 с.
25. Галеев Р.Р., Чагина Е.Г. Влияние фторидов на продуктивность и качество сельскохозяйственных культур в степной зоне Республики Хакасия // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2012. №8. С. 38–41.
26. Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. *Pinus sylvestris* as a bio-indicator of territory pollution from aluminum smelter emissions // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017. Vol. 24, N11. Pp. 10279–10291. DOI: 10.1007/s11356-017-8674-5.
27. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2016 году». Иркутск, 2017. 274 с.
28. Методы изучения лесных сообществ. СПб., 2002. 240 с.
29. Воробьева Г.И. Классификация и систематика почв южной (освоенной) части Иркутской области: методические указания. Иркутск, 1999. Ч. 1. 47 с.
30. Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М., 1990. 335 с.
31. Сорокина Е.П., Дмитриева К.К., Карпов Л.К. Анализ регионального геохимического фона как основа эколого-геохимического картирования равнинных территорий // *Прикладная геохимия*. Вып. 2. М., 2001. С. 316–339.
32. Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. М., 2001. 689 с.

Поступила в редакцию 6 июня 2018 г.

После переработки 17 августа 2018 г.

Принята к публикации 4 сентября 2018 г.

**Для цитирования:** Калугина О.В., Михайлова Т.А., Шергина О.В. Использование травянистых растений (*Chamaenerion Angustifolium* и *Tanacetum Vulgare*) для мониторинга загрязнения территорий фторсодержащими выбросами // *Химия растительного сырья*. 2019. №1. С. 309–316. DOI: 10.14258/jcpr.m.2019014097.

*Kalugina O.V.\**, *Mikhailova T.A.*, *Shergina O.V.* USE HERBAL PLANTS (*CHAMAENERION ANGUSTIFOLIUM* AND *TANACETUM VULGARE*) FOR MONITORING OF TERRITORIES POLLUTED BY FLUORINE-CONTAINING EMISSIONS

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lermontova str. 132, Irkutsk, 664033 (Russia), e-mail: kalugina@sifibr.irk.ru*

Specific features of fluoride accumulation by two species of herbaceous plants – *Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub and *Tanacetum vulgare* L., were found at different distances from the aluminum smelter located in the Baikal region. The highest fluorine content was recorded at the distance of 3 km from the smelter: 433 mg / kg of dry weight in *C. angustifolium*, 306 mg / kg in *T. vulgare*. According to the level of accumulation of fluorine, the organs of *C. angustifolium* were arranged in the following order (as the concentration decreases): leaves > roots > stems ≥ flowers, for *T. vulgare* the another sequence was typical: roots > leaves > flowers ≥ stems. Calculation of the root barrier coefficient for different organs of *C. angustifolium* and *T. vulgare* indicates the existence of barrier mechanisms that prevent the entry of fluorine from the soil into the aerial part of plants. A feature of the accumulation of fluoride in the leaves of *C. angustifolium* is its active foliar absorption and barrier-free intake from the soil. It has been established that the rate of fluoride accumulation by the reproductive organs of both species is much lower than by the assimilation organs. The data obtained make it possible to recommend using *C. angustifolium* for monitoring air fluoride pollution, and *T. vulgare* – for soil fluoride pollution.

**Keywords:** *Chamaenerion angustifolium*, *Tanacetum vulgare*, ground organs, underground organs, fluoride compounds, aluminum works.

## References

1. Kulikov B.P., Storozhev YU.I. *Pylegazovyye vybrosy alyuminiyevykh elektrolizerov s samoobzhigayushchimisya anodami*. [Dust-gas emissions of aluminum electrolysis cells with self-baking anodes]. Krasnoyarsk, 2012, 268 p. (in Russ.).
2. Okorkov V.V., Abdarakhmanov M.P. *Agrokhimiya*, 1994, no. 4, pp. 85–95. (in Russ.).

---

\* Corresponding author.

3. Kostyshin, S.S., Perepelitsa, O.O., Smetanyuk, O.I. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2011, no. 6, pp. 843–849. (in Russ.).
4. Pashova V.T. *Agrokimiya*, 1980, no. 10, pp. 165–171. (in Russ.).
5. Divan Junior A.M., Oliva M.A., Ferreira F.A. *Ecological indicators*, 2008, vol. 8, pp. 454–461. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.04.008.
6. Mikhaylova T.A., Kalugina O.V., Shergina O.V. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 725–731. (in Russ.).
7. Martin S.C., Lariviere C. *JOEM*, 2014, vol. 56, no. 5S, pp. 33–39. DOI: 10.1097/JOM.0000000000000135.
8. Mandra YU.A. *Rasteniya kak indikatory ekologicheskogo sostoyaniya sredy kurortnogo regiona : avtoref. diss. kand. boil. nauk*. [Plants as indicators of the ecological state of the environment of a resort region: dissertation of the candidate of biological sciences.]. Moscow, 2010. 22 p. (in Russ.).
9. Gorshkov A.G., Mikhaylova T.A., Berezhnaya N.S., Vereshchagin A.L. *Doklady Akademii nauk*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 247–249. (in Russ.).
10. Dmichowski W., Gozdowski D., Baczevska A.N. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 197, pp. 109–118. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.09.062.
11. Bruks R.R. *Biologicheskiye metody poiskov poleznykh iskopayemykh*. [Biological methods of prospecting for minerals]. Moscow, 1986, 312 p. (in Russ.).
12. Il'kun G.M. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya*. [Pollutants of the atmosphere and plants]. Kiev, 1978, 246 p. (in Russ.).
13. Nikolayevskiy V.S. *Ekologicheskaya otsenka zagryazneniya sredy i sostoyaniya nazemnykh ekosistem metodami fitoindikatsii*. [Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems using phytospectroscopy methods]. Moscow, 1998, 193 p. (in Russ.).
14. Halmer M.M., Schmincke H.U., Graf H.F. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2002, vol. 115, pp. 511–528. DOI: 10.1016/S0377-0273(01)00318-3.
15. Arnesen A.K.M. *Plant Soil.*, 1997, vol. 191, pp. 13–25. DOI: 10.1023/A:1004210713596.
16. Vike E. *The Science of the Total Environ.*, 1999, vol. 236, pp. 75–901. DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00268-5.
17. Zuo H., Chen L., Kong M., Qiu L., Lü P., Wu P., Yang Y., Chen K. *Life Sciences*, 2018, vol. 198, pp. 18–24. DOI: 10.1016/j.lfs.2018.02.00.
18. Kabata-Pendias A., Pendias KH. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. [Trace elements in soils and plants]. Ed. YU.Ye. Sayet. Moscow, 1989, 439 p. (in Russ.).
19. Il'in V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoy oblasti*. [Trace elements and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, 2001, 229 p. (in Russ.).
20. Rozhkov A.S., Mikhaylova T.A. *Deystviye ftorsoderzhashchikh emissiy na khvoynnye derev'ya*. [Effect of fluoride emissions on conifers]. Novosibirsk, 1989, 160 p. (in Russ.).
21. Arnesen A.K.M., Abrahamsen G., Sandvik G., Krogstad T. *The Science of the Total Environment*, 1995, vol. 163, pp. 39–53. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04479-K.
22. Treshow M., Anderson F.K. *Plant Stress from Air Pollution*. John Wiley, Chichester, 1989. 283 p.
23. Xie Z.M., Ye Z.H., Wong M.H. *Environment International*, 2001, vol. 26, I. 5-6, pp. 341–346. DOI: 10.1016/S0160-4120(01)00010-1.
24. Nikolayevskiy V.S. *Biologicheskiye osnovy gazoustoychivosti rasteniy*. [Biological basis of gas resistance of plants]. Novosibirsk, 1979, 278 p. (in Russ.).
25. Galejev R.R., Chagina Ye.G. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, no. 8, pp. 38–41. (in Russ.).
26. Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, vol. 24, no. 11, pp. 10279–10291. DOI: 10.1007/s11356-017-8674-5.
27. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2016 godu»*. [State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2016"]. Irkutsk, 2017, 274 p. (in Russ.).
28. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv*. [Methods of studying forest communities]. St. Petersburg, 2002, 240 p. (in Russ.).
29. Vorob'yeva G.I. *Klassifikatsiya i sistematika pochv yuzhnoy (osvoyennoy) chasti Irkutskoy oblasti: metodicheskiye ukazaniya*. [Classification and taxonomy of the soils of the southern (developed) part of the Irkutsk region: guidelines]. Irkutsk, 1999, part 1, 47 p. (in Russ.).
30. Sayet YU.Ye., Revich B.A., Yanin Ye.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy*. [Environmental Geochemistry]. Moscow, 1990, 335 p. (in Russ.).
31. Sorokina Ye.P., Dmitriyeva K.K., Karpov L.K. *Prikladnaya geokhimiya*. [Applied geochemistry]. Moscow, 2001, issue 2, pp. 316–339. (in Russ.).
32. *Praktikum po agrokhimii*. [Workshop on agrochemistry]. Ed. V.G. Mineyev. Moscow, 2001, 689 p. (in Russ.).

Received June 6, 2018

Revised August 17, 2018

Accepted September 4, 2018