

7. Майоров И.С. Биоресурсное природопользование и экологическая безопасность: использование методов ландшафтной и региональной экологии в обосновании устойчивого природопользования в зоне экотонных морских побережий Дальнего Востока России. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2009. – 308 с.
8. Майоров И.С. Концепция экологической безопасности береговой зоны дальневосточных морей. // Риски и инновации в управлении стран АТР: сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Владивосток: Русский остров, 2010. – С. 58–61.
9. Майоров И.С., Селедец В.П., Сырица М.В. Этапы формирования региональной системы природоохранных территорий: мат-лы II Междунар. экол. форума. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2007. – С. 185–189.
10. Семкин Б.И. Жизнь и вселенная. Цивилизации будущего //Междунар. семинар по проблемам сознания в трудах индийских философов и современные аспекты человеческой деятельности. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1998. – С. 178–180.
11. Методы сравнительного анализа компонентов биоразнообразия ботанических памятников природы / Б.И. Семкин [и др.] // Ботан. журн. – СПб., 2010. – Т. 95. – № 3. – С. 408–421.
12. Тарханов В.М., Мошков А.В. Критерий экологической эффективности природопользования (возобновляемые природные ресурсы) // Устойчивое развитие дальневосточных регионов: эколого-географические аспекты. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – С. 120–130.
13. Чайковский Ю.В. Элементы эволюционной диатропики. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
14. Чайковский Ю.В. Познавательные модели, плюрализм и выживание // Путь: междунар. филос. журн. – 1992. – № 1. – С. 62–108.



УДК 582: 581.5: 504.3.054

Т.Н. Отнюкова

#### КУПЕНА ЛЕКАРСТВЕННАЯ (*POLYGONATUM ODORATUM*) – ИНДИКАТОР АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ФТОРОМ

На территории г.Красноярска (Академгородок) выявлены симптомы поражения листьев купены лекарственной (*Polygonatum odoratum*) в течение вегетационного периода и в разные годы наблюдений, показана взаимосвязь степени поражения листьев с уровнем накопления в них фтора (0–56 мг F /кг сухого веса); обсуждаются вопросы биоиндикации и биомониторинга атмосферного загрязнения фтором с использованием травянистых растений.

**Ключевые слова:** биоиндикация, *Polygonatum odoratum*, фтор, симптомы поражения фтором, атмосферное загрязнение, городская территория

Т.Н. Otnyukova

#### SOLOMON'S SEAL (*POLYGONATUM ODORATUM*) AS THE BIOINDICATOR OF FLUORINE ATMOSPHERIC POLLUTION

In the territory of Krasnoyarsk (Akademgorodok) the Solomon's seal (*Polygonatum odoratum*) leaf affection symptoms during the vegetative period and in different observation years are revealed; the interrelation between the leaf affection extent and the level of fluorine accumulation in them (0–56 mg of F/kg of dry weight) is shown; issues of bio-indication and bio-monitoring of fluorine atmospheric pollution by grassy plant use are discussed.

**Key words:** bio-indication, *Polygonatum odoratum*, fluorine, fluorine affection symptoms, atmospheric pollution, urban area.

**Введение.** Неблагоприятное влияние фтора на растения известно с конца XIX века, с 40-х годов прошлого столетия загрязнение атмосферы фтором представляло значительную проблему для многих стран мира [1–4]. Однако с конца 80-х годов в результате использования новых технологий, применения природоохранительных и законодательных мер считается, что загрязнение атмосферы фторидами (в основном в форме HF и SiF<sub>4</sub>) носит локальный характер [5–10].

Фтористый водород (так же, как и SiF<sub>4</sub>) на 1–3 порядка токсичнее обычных газообразных загрязнителей (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, PAN, Cl<sub>2</sub> или Cl-), и поэтому даже незначительные концентрации фторидов в атмосфере наносят огромный вред растениям [5, 6].

Немногие растения чувствительны к загрязнению фтором [5, 6], большинство видов толерантны, однако это не означает, что толерантные виды растений не аккумулируют фтор в избытке.

Наиболее подходящими объектами исследования загрязнения атмосферы фтором являются чувствительные виды растений, которые не только аккумулируют фтор, но также реагируют на загрязнение специфически. Признаки поражения чувствительных видов фтором наблюдаются через 1–3 дня при концентрации 0.8 мг HF /м<sup>3</sup> и в течение вегетационного сезона при содержании 0.25–0.30 мг HF /м<sup>3</sup> в атмосфере [5, 6]. Впервые механизм транслокации фтора в растениях был описан более 70 лет назад [цит. по: 5]. Газы проникают через устьица и транспирационными потоками транспортируются в верхушечную и периферическую часть листа. Когда концентрации фтора превышают предел устойчивости конкретного вида, появляются первичные симптомы поражения – краевые и верхушечные некрозы листа. Чем ниже предел устойчивости, т.е. чем чувствительнее растение, тем раньше возникают некрозы.

Начальная стадия поражения растений фтором наблюдается в виде бледнеющего пятна, как будто бы смоченного водой или прихваченного морозом. Окраска области поражения быстро изменяется – от желтоватой до красноватой, в дальнейшем некроз и здоровая ткань отделяются друг от друга более темной полосой (пояском). При длительном и многократном воздействии может быть несколько таких зон поражения на листьях и хвое растений [2, 5].

Чувствительными индикаторами являются некоторые виды деревьев и кустарников из родов *Pinus* (сосна), *Eucalyptus* (эвкалипт), *Berberis* (барбарис), а также однодольные растения (*Convallaria*, *Gladiolus*, *Nemerocallis*, *Iris*, *Lilium*, *Maianthemum*, *Polygonatum*) и другие виды [5–8].

**Цель работы.** Выявить индикаторные виды растений, изучить симптомы поражения листьев купены лекарственной (*Polygonatum odoratum*) в течение вегетационного периода и в разные годы наблюдений, связать степень поражения листьев купены с уровнем накопления в них фтора.

**Объекты и методика исследований.** Исследования проведены на территории г. Красноярска в березовой роще жилого района Академгородка, находящегося на расстоянии 18–20 км на запад-юго-запад от Красноярского алюминиевого завода (КрАЗ). Динамика выбросов основных загрязняющих веществ в г. Красноярске и Красноярском крае (табл.) представлена на основе государственных докладов «О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края» [11–15]. Как следует из таблицы, основная доля специфических загрязняющих веществ приходится на долю Красноярска; объемы выбросов хлора и без(а)пирена в атмосферу за последние годы снизились, в то время как объемы выбросов фтористых соединений увеличились.

#### Выбросы специфических загрязняющих веществ в атмосферу промышленными предприятиями городов Красноярского края, по [11–15], тонн/год

Год	Стр. [11–15]	Фтористые соединения		Хлор		Бенз(а)пирен	
		Кр	Ккрай	Кр	Ккрай	Кр	Ккрай
2001	С. 179	682,539	686,232	34,795	35,767	2,150	2,162
2006	С. 121	1104,9	1105,055	19,591	20,657	2,418	2,422
2007*	С. 143	2222,999	2229,833	19,756	20,814	2,286	2,291
2008*	С. 131	2071,52	2072,16	19,322	20,327	2,012	2,012
2009*	С. 126	1768,659	1769,281	12,893	13,922	1,954	1,972

Примечание: Кр – г. Красноярск; Ккрай – крупные города Красноярского края (за исключением Норильска); \* – выбросы с учетом, помимо газообразных, так же и твердых фтористых соединений.

Основным объектом исследования является купена лекарственная (*Polygonatum odoratum*) – доминантный вид травяно-кустарничкового яруса березового леса. Наблюдение за состоянием купены проводилось в разные годы (1998–2012 г.). Последовательные наблюдения за динамикой роста и развития купены от проростков до отмирания растения проведены в течение вегетационного сезона в 2012 г. Определение фтора в растительных образцах проведено в Институте химии и химических технологий (г. Красноярск) и Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

## Результаты исследования

Симптоматика поражения купены лекарственной в течение вегетационного периода (рис. 1)



Рис. 1. Динамика степени поражения листьев купены лекарственной (*Polygonatum odoratum*) в 2012 г. (березовая роща, Академгородок, г. Красноярск): а – без видимых пятен (самый нижний лист на кончике и по краю справа с «вмятинами» на месте будущих пятен); б – без пятен на двух верхних листьях и с пятнами первичного происхождения на пяти нижних (два нижних листа – 5–7 пятен, три средних – 1–2 пятна); в – с пятнами первичного происхождения на двух верхних листьях, на нижних листьях четкие контуры пятен; г – пятна вторичного происхождения с обширными некрозами на пяти верхних листьях: на двух нижних листьях контуры мелких пятен стали отчетливее; непораженная часть листа зеленая; д – четкие контуры вторичных пятен, появление третьего ряда пятен (красные штрихи, мелкие оконтуренные пятна, белесые некрозы без отчетливых контуров); непораженная часть листа зеленая; е – верхние листья поникшие и желтые, нижние листья прямо отстоящие, зеленоватые и желтеющие

Наблюдения за ростом и развитием купены лекарственной, проведенные в 2012 году в березовой роще Академгородка, показали, что проростки купены размером до 0,5 см появились 7–9 мая, к 18–19 мая выросли до 2–3 см. Первые листья раскрылись 20–22 мая, до 27 мая распустились 4–5 нижних листочка, до 2–4 июня все листья. Максимальное количество листьев на стебле (4)7–11(13).

Первые признаки поражения растений отмечены 2–4 июня на самых нижних листьях в виде неотчетливых «мокрых» пятен, как будто бы смоченных водой или прихваченных морозом (рис. 1, а). Эта первич-

ная, мало заметная стадия очень быстро переходит в стадию видимого поражения растения, когда пятно последовательно изменяет окраску от серо-желтого до буровато-красного.

На четвертый день наблюдений на кончике и по краю листа обнаружены отчетливые пятна некрозов, в центре белёдые, а по периферии оконтуренные красно-бурой каймой. Как видно из рисунка 1, б, поражены верхушки пяти нижних из семи распустившихся листьев; при этом два верхних листа еще не имеют пятен.

Следующий срок наблюдения за тем же растением через полторы недели (рис. 1, в) показал появление некрозов на кончиках двух верхних листьев. На нижних пяти листьях количество некрозов не увеличилось, однако окаймляющие их контуры стали более четкими. Такие пятна, возникающие поочередно на всех листьях снизу (старые) вверх (самые молодые), можно назвать некрозами первичного происхождения.

Некрозы вторичного происхождения более крупного размера и возникают ниже верхушки листа в отличие от первых. Вторичные поражения листа также наблюдаются в виде малозаметных, как бы «смоченных водой» пятен, быстро приобретающих красноватый оттенок, в дальнейшем обесцвеченных и по периферии оконтуренных узкой красно-бурой каймой.

Как видно из рисунка 1, г, вторичные некрозы возникают на верхних листьях; и обычно, чем ниже расположен на стебле лист, тем меньше площадь его поражения. Вторичные пятна оконтурены более тонкой и светлой каймой по сравнению с более толстой и темнее окрашенной каймой первичных пятен.

Следующий срок наблюдения показал появление ближе к основанию листа третьего ряда пятен (рис. 1, д), в виде красноокрашенных мелких штрихов и крупных мазков. При таком состоянии непораженная часть листа сохраняет еще свой зеленый цвет.

Очередное наблюдение через 4 дня показало неожиданный результат – полное увядание растения (рис. 1, е). Три верхних листа (самые молодые) поникли и пожелтели, зелень сохранилась только на самом нижнем листе.

Таким образом, в результате проведенных наблюдений за динамикой роста и развития купены лекарственной установлено:

- Визуальное поражение растения – некроз – наблюдается через 10–14 дней после разворачивания листьев, со временем степень поражения листа усиливается.

- Выделяется три типа некрозов (с интервалом 2–3 недели): некрозы первичные, которые возникают на верхушке и по краю листа с нижних листьев и вверх по стеблю; некрозы вторичного происхождения – обширные по площади, которые поражают молодые листья сверху вниз по стеблю; некрозы третьего порядка, покрывающие мелкой, окрашенной красным цветом россыпью все листья.

- Растения увядают и, соответственно, отмирают раньше на полтора–два месяца (июль) завершения срока вегетации (сентябрь).

#### *Состояние купены лекарственной в разные годы наблюдений (рис. 2, 3)*

Наблюдения, проведенные за состоянием купены, произрастающей в Академгородке (территория г. Красноярск) в течение 1998–2012 г., выявили динамику изменения степени поражения листьев растения, что может быть связано с неблагоприятными условиями произрастания. Как видно из приведенных рисунков 2, 3, состояние растений за последние годы катастрофически ухудшилось.



Начало сентября 2001 г.

Середина августа 2010 г.

Середина июля 2012 г.

*Рис. 2. Степень поражения увядающих растений (Polygonatum odoratum) в разные годы наблюдений (березовая роща, Академгородок, г. Красноярск). Пятна некрозов оконтурены тёмной каймой, прилегающая к стеблю часть еще зеленая*



Рис. 3. Отдельные листья в увеличенном виде. Пятна некрозов оконтурены тёмной каймой, прилегающая к стеблю часть еще зеленая

Если увядание купены десять (и более) лет назад начиналось только в сентябре (естественное увядание), то в 2010 г. увядание наблюдалось в середине августа, а в 2012 г. в середине июля (рис. 2). Такая тенденция ускоренного увядания растения также совпадает с увеличением площади поражения листьев пятнами некрозов к концу срока вегетации: в 2001 г. – до 10%, 2010 г. – до 50%, 2012 г. – более 50% (рис. 3).

Таким образом, наблюдения в течение ряда лет за состоянием купены лекарственной показали, что причиной раннего увядания растений является высокая степень поражения листьев, т.е. обширная площадь некрозов.

#### Содержание фтора

Как показывают результаты исследования, фтор накапливается с ростом растения и длительностью воздействия окружающей воздушной среды (рис. 4).

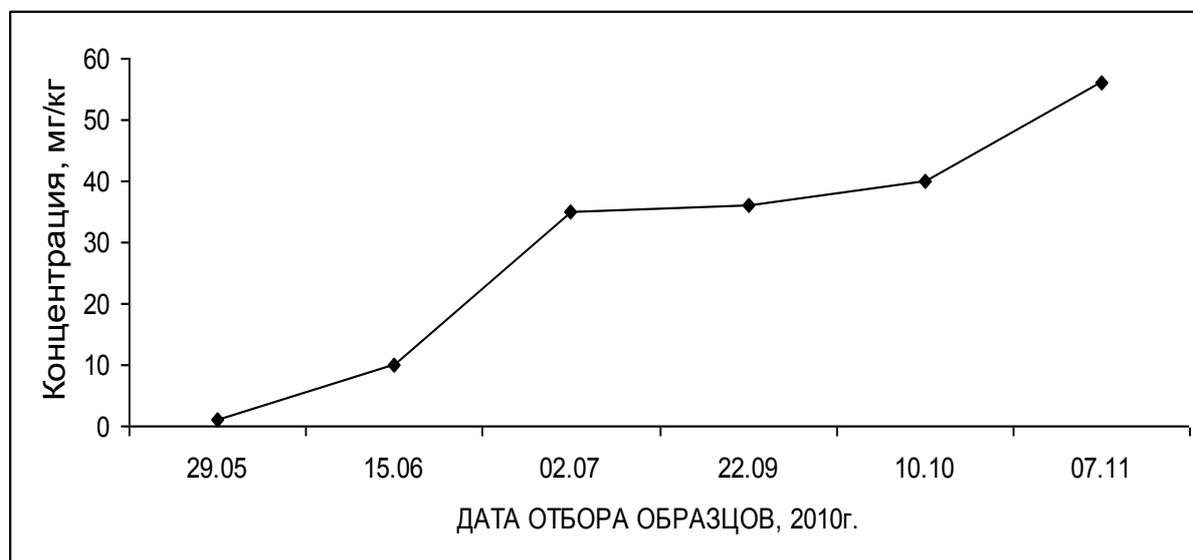


Рис. 4. Динамика накопления фтора в листьях купены лекарственной (*Polygonatum odoratum*) в 2010 г. (березовая роща, Академгородок, г. Красноярск)

В образцах купены, отобранных в ранние сроки развития (проростки и молодые листья), фтор не обнаружен (и/или ниже предела выявления) (рис. 4), что свидетельствует о том, что купена, вероятно, не поглощает фтор из почвы.

Однако в листьях, подверженных воздействию окружающей воздушной среды в течение 2–3 недель и имеющих отчетливо выраженные пятна первичных некрозов, концентрации фтора в среднем равны 10 мг/кг (рис. 4).

Еще через две недели произрастания растений в условиях окружающей воздушной среды содержание фтора в листьях увеличилось в среднем в 4 раза (рис. 4). Такое резкое накопление фтора связано с появлением на листьях обширных пятен некрозов вторичного происхождения. В дальнейшем, с появлением небольших пятен третьего порядка, концентрации фтора возросли незначительно.

Интересно, что наиболее высокие концентрации фтора обнаружены в листьях засыхающих и засохших растений, отобранных в самые поздние сроки (рис. 4), пока стебли не полегли на почву. Эти данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований, которые показали, что концентрации элементов выше в засохших и перезимовавших растениях, чем в вегетирующих [16].

Таким образом, изучение элементного состава купены лекарственной в различные сроки вегетации показало: накопление фтора связано с видимыми признаками поражения растения – некрозами, и чем больше площадь поражения листа, тем выше концентрации фтора.

**Обсуждение результатов и выводы.** Биоиндикаторы – это чувствительные виды растений, которые реагируют на загрязнение окружающей среды, изменяя свое морфологическое состояние. Симптоматика поражения фтором в значительной степени специфична, в первую очередь реагируют самые чувствительные к фтору виды растений, менее чувствительные виды реагируют при более высоких концентрациях и при большей продолжительности воздействия загрязнителя. Симптомы поражения различных растений фтором описаны в многочисленных научных статьях [1, 2, 5, 6] и проиллюстрированы фотографиями [3].

Виды рода *Polygonatum* (*Polygonatum sp.* в Западной Европе, *P. biflorum* в Северной Америке) [5] не относятся к числу таких признанных индикаторов загрязнения фтором, как *Iris*, *Gladiolus*, *Hemerocallis*, *Lilium* [5–8]. В Европе в качестве индикатора атмосферного загрязнения фтором широко используется *Gladiolus*, определенные сорта которого специально высаживают в грунт, так как степень поражения верхушки листьев связана с определенным уровнем концентраций фтора в воздухе и накоплением фтора в растении [5–7].

В Красноярске *Iris*, *Gladiolus*, *Lilium*, *Convallaria* (и другие) наряду с *Polygonatum* также являются индикаторами загрязнения фтором, так как у всех этих растений обнаружены симптомы поражения листьев. Преимущество купены как биоиндикатора в том, что этот вид в массовом количестве произрастает в естественных природных условиях и в зеленых насаждениях города и в его окрестностях, в то время как встречаемость других видов в основном ограничена искусственными посадками.

Биомониторы – это такие растения, которые не только аккумулируют фтор (или другие загрязнители), но также обнаруживают биохимическую, физиологическую, гистологическую, генетическую, морфологическую реакцию на воздействие загрязнителя.

Морфологическое состояние купены лекарственной в Академгородке (рис. 1–3), соответствует симптоматике поражения листьев растения фтором, которое также подтверждается элементным анализом и показывает, что с возрастом листьев концентрации фтора увеличиваются (рис. 4). В настоящей работе впервые описаны симптомы поражения купены фтором в течение вегетации. Показано, что в современных условиях городского загрязнения некрозы на листьях возникают через 2–3 недели после прорастания надземной части растения, а еще через 6–7 недель растение начинает отмирать. За более чем десятилетний период наблюдений отмечено увеличение площади поражения листьев в течение сезона и более быстрое увядание растения, т.е. значительное сокращение периода вегетации.

Все эти результаты хорошо объясняются специфическими выбросами г. Красноярска (табл. 1). При выбросах HF в атмосферу в 2000–2003 гг. в объеме 676–708 тонн в год [17] увядание купены наступало в сентябре, и поражение листьев в среднем едва достигало 10% (рис. 2, 3). Заметное изменение состояния купены обнаружено в 2006–2008 гг., что согласуется с увеличением объема выбросов до 1,1–2,2 тыс. тонн в год; в этот период признаки первичного поражения растения отмечались в первых числах июля, а отмирание в августе–сентябре. С 2010 по 2012 г. состояние купены катастрофически ухудшалось, особенно в 2012 г., когда фаза отмирания растений отмечена в конце июля.

Таким образом, ухудшение морфологического состояния купены лекарственной и увеличение концентраций фтора в листьях растения являются показателями атмосферного загрязнения фтором в г. Красноярске.

## Литература

1. *Thomas M.D.M.A.* Effects of air pollution on plants // *Air Pollution*. – Geneva: World Health Organization, 1961. – P. 233–278.
2. *Treshow M.* Fluorides as air pollutants affecting plants // *Annual Review Phytopathology*. – 1971. – V. 9. – P. 21–44.
3. *Laeasse L., Treshow M.* Diagnosing Vegetation Injury Caused by Air Pollution. – Washington DC: U.S. Government Printing Office, 1978. – 340 p.
4. *Bohne H.* Fluorides and sulphur dioxides as causes of plant damage // *Fluoride: Journal of the International Society of Fluoride Research*. – 1970. – V. 3. – № 3. – P. 137–142.
5. *Weinstein L.H., Davison A.W.* Native plant species suitable as bioindicators and biomonitors for airborne fluoride // *Environmental Pollution*. – 2003. – V. 125. – P. 3–11.
6. *Weinstein L.H., Davison A.W.* Fluorides in the Environment. – Newcastle: CABI Publishing, 2004. – 287 p.
7. Susceptibility of various *Cladiolus* cultivars to fluoride pollution and their suitability for bioindication / *A. Klumpp* [et al.] // *Pesg. Agropec. Bras.* – 1997. – V.32. – № 3. – P. 239–247.
8. *Hemerocallis* as bioindicator of fluoride pollution in tropical condition / *A. Klumpp* [et al.] // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 1995. – V. 35. – P. 27–42.
9. *Vike E., Håbjørg A.* Variation in fluoride content and leaf injury on plants associated with three aluminium smelters in Norway // *Science of the Total Environment*. – 1995. – V. 163. – № 1–3. – P. 25–34.
10. *Vike E.* Air-pollutant dispersal patterns and vegetation damage in the vicinity of tree aluminium smelters in Norway // *Science of the Total Environment*. – 1999. – V. 236. – P. 75–90.
11. О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2001 г. / под ред. Ю.М. Мальцева. – Красноярск, 2002. – 226 с.
12. О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2006 г. / под ред. И.В. Варфоломеева, Ю.М. Мальцева. – Красноярск, 2007. – 232 с.
13. О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2007 г. / под ред. И.В. Варфоломеева, Ю.М. Мальцева. – Красноярск, 2008. – 266 с.
14. О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2008 г. / под ред. Д.В. Варфоломеева. – Красноярск, 2009. – 226 с.
15. О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2009 г. / под ред. Д.В. Варфоломеева. – Красноярск, 2010. – 237 с.
16. Элементный состав некоторых видов растений и грибов на территории заповедника «Столбы» / *Т.Н. Отнюкова* [и др.] // *Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – Вып. 1. – С. 30–35.
17. О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 1997 г.– Красноярск, 1998.

