

ОБЩИЕ РАБОТЫ

УДК 551.455

DOI: 10.18101/2542-0623-2018-2-75-86

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СТЕПЕЙ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© **Давыдова Нина Даниловна**

кандидат географических наук, профессор,
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: davydova@irigs.irk.ru

В условиях атмосферного загрязнения в степях не прослеживается поражение травянистой растительности, как это наблюдается в зоне тайги в случае с хвойными породами деревьев. Кажущееся в степи благополучие обманчиво. Об этом можно судить на основании результатов количественного химического анализа. Представлены данные по содержанию 20 химических элементов. Информация о химическом составе разных видов растений фоновой территории использована в качестве эталона сравнения с аналогами растений зоны атмосферного загрязнения, где установлены основные поллютанты (F, Na, Al, Ni). В качестве приоритетного элемента-загрязнителя как преобладающего по массе поступления и токсичности выделен фторид-ион. Площадь земель с его содержанием от 0,5 до 6,0 ПДК составляет около 250 км². Представлена карта содержания приоритетного загрязнителя — фтора — в надземной зеленой фитомассе степных ландшафтов. Определена устойчивость ряда растений к атмосферному загрязнению фтором на основании теории минеральной детоксикации загрязнителей в растительных клетках и согласно уровню содержания минеральных солей (зольности), а также содержания фтора в травянистых растениях, лишайниках, хвое и листьях деревьев.

Ключевые слова: растения; поллютанты; содержание элементов; устойчивость; нагрузки.

Введение

В Сибири одной из проблем экологической безопасности становится перемещение центра производства алюминия из западных районов России в восточные с заменой устаревших заводов новыми большей производительности (до 1,0 млн т в год алюминия). Поступление загрязняющих веществ от заводов через атмосферу негативно сказывается на всех компонентах природной среды, прежде всего на растительности.

Цель — выявить уровни накопления поллютантов в растениях в зависимости от нагрузок приоритетных элементов-загрязнителей, поступающих в природную среду при производстве алюминия, установить площадь загрязнения растительного покрова и оценить степень экологической опасности.

Объекты и методы исследования

Изучались степные ландшафты Южно-Минусинской котловины, находящиеся 30 лет под воздействием пылегазовых эмиссий предприятий ОАО РУСАЛ «Саяногорск» (Саяногорского и Хакасского заводов), выпускающие в год более 800

тыс. тонн алюминия, которые являются основными поставщиками поллютантов на исследуемой территории. Сбор полевых материалов и оценка влияния пылегазовых эмиссий на ландшафты проводились по широкой комплексной программе [Давыдова и др., 2014].

Пробы растительного материала отбирались как на территории, подверженной воздействию пылегазовых эмиссий, так и в условиях чистого фона, что определялось по уровню загрязнения снежного покрова. Таким же способом выделены ключевые участки — ландшафтно-геохимические профили. На территории исследования заложено 480 площадок, где наряду с почвами отбирали надземную зеленую фитомассу рамочным методом с площади 0,25 м² в трехкратной повторности [Гришина, Самойлова, 1971], а также отдельные виды травянистых и древесных растений, мхи, лишайники. В качестве основных индикаторов были использованы представитель травянистых видов лапчатка длиннолистная (*Potentilla longifolia* Willd. ex Schlecht), из древесных видов, встречающихся на исследуемой территории, — тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Травяные смеси — укусы — анализировались преимущественно на содержание фтора. Видовая принадлежность растений устанавливалась по [Определитель..., 1979] и консультации А. В. Белова и В. Г. Волковой.

Растения сжигали, полученную золу анализировали на содержание 19 химических элементов — Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, Mn, P, Sr, Ba, V, Zn, Cu, Ni, Cr, Co, Pb — в сертифицированном химико-аналитическом центре Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН с использованием приборной базы Байкальского центра коллективного пользования. Применялся спектрометр: атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой Optima 2000 DV [ПНДФ 16.1:2.3:3-11-98]. Подготовка проб к анализу проводилась сплавлением навески золы с метаборагом лития 1:5 при температуре 850° и последующим растворением в 5% HNO₃ с помощью магнитной мешалки. Для определения содержания фтора навеска золы смешивалась в отношении 1:5 с KNaCO₃ и в течение 10 мин подвергалась сплавлению в муфельной печи при t° = 800–850. Полученный сплав охлаждали и растворяли в дистиллированной воде с последующей нейтрализацией раствора до pH = 6,0. Далее отбирали 5 мл полученного раствора, добавляли для стабилизации 5 мл буфера (pH = 5,0) и устанавливали концентрацию фтора с помощью фторселективного электрода на иономере «Эксперт-001» и стандартной шкалы концентраций фтора [РД 52.24.360-2008].

Уровни содержания химических элементов в растениях фона оценивали относительно средних значений химических элементов в растениях суши [Малюга, 1963], других регионов [Уфимцева, Терехина, 2005]. С этой целью рассчитывали коэффициенты концентрации (КК) и рассеяния (KR). Для оценки изменения уровней содержания отдельных химических элементов в растениях зоны загрязнения по сравнению с фоном применялись коэффициенты концентрации (Kс=Са/Сф) и рассеяния (Kг=Сф/Са), где Са и Сф соответственно концентрации элемента в объектах зоны загрязнения (аномалии) и фона. Изменение химического состава растений под воздействием пылегазовых эмиссий оценивалось с помощью суммарного коэффициента биогеохимической трансформации $Z_v = \frac{\sum K_c + \sum K_g}{n_1 + n_2 - 1}$, где n₁, n₂ — количество химических элементов с Kс > 1,5 и с Kг > 1,5 соответственно [Сорокина, 2013]. Уровни токсичности

поллютантов оценивали согласно МДУ кормов сельскохозяйственных животных [Временный..., 1987]. Для отображения распределения концентраций фтора в зеленой фитомассе территории были применены топологическая основа М 1:250 000 и пространственная интерполяция данных методом ближайшего соседства (Nearest-neighbor interpolation), реализованная в ГИС-пакетах MapInfo.

Обсуждение результатов исследования

В. И. Вернадский [1978] показал тесную связь состава организмов и среды обитания, несомненную роль живого вещества в миграции, рассеянии и концентрации не только типичных элементов-биофилов, но и редких, и рассеянных элементов. Он указал пути изучения круговорота макро- и микроэлементов в природе. Комплексный ландшафтно-геохимический подход с биогеохимическим аспектом исследований, сопряженный с изучением всех звеньев природных (или техногенных) ландшафтов, дает наиболее полную характеристику миграции и аккумуляции химических элементов, позволяет оценить среду обитания организмов и их реакцию на изменения привычных условий [Глазовская, 2007].

Среди широкого спектра исследуемых компонентов геосистем большое внимание отводится растительности и почвенному покрову. Растительный покров относится к числу наиболее чувствительных компонентов геосистем являясь при этом первым экраном на пути осаждения атмосферных выпадений. Они поглощают из воздуха и нейтрализуют в тканях значительное количество вредных компонентов промышленных эмиссий, способствуя сохранению оптимального газового баланса в атмосфере. Воздействие пылегазовых эмиссий на растения зависит от состава и фазы вещества (жидкая, твердая, газообразная), метеоусловий, стадии развития и селективности вида растений к поглощению химических элементов, величины нагрузок поллютантов. Часто растения служат накопителями загрязняющих веществ.

Все анализируемые виды растений фона близки по химическому составу (табл. 1). Для них характерно преобладание Са над Si, повышенное содержание Sr и пониженное Na. Лапчатка длиннолистная выделяется достаточно высоким уровнем содержания Fe и Ba, а сосна обыкновенная — P, K и Zn. Сопоставление полученных результатов по содержанию элементов в растениях с данными Д. П. Малюги [1963] выявило региональную особенность растений, которая проявляется в повышенном количестве щелочноземельных элементов (КК — $Ca_{4,8-7,0}Sr_{2,4-3,3}Ba_{1,5-1,9}$). Это обусловлено богатством почв указанными элементами, в том числе присутствием текстурного карбонатного горизонта, содержащего углекислые соли щелочноземельных элементов.

При сопоставлении содержаний фтора в растениях фона (табл. 1) с данными В. В. Добровольского [1983] получены значения КК в диапазоне 1,4–2,6, которые в общем соответствуют его нормальным уровням, увеличиваясь в последовательности: сосна сибирская — 4,86, лапчатка длиннолистная — 8,2, тополь бальзамический — 10,44 мг/кг сухого вещества.

Сравнение химического состава сосны обыкновенной в исследуемой территории и Южной Карелии [Уфимцева, Терехина, 2005] показало различия по содержанию Fe, Mn и Na, которые рассеиваются (KR — $Mn^{19,2-38,6}Na^{9,4-18,2}Fe^{1,7-2,2}$), что объяснимо для Fe и Mn — элементов, подвижных в условиях тайги и легкодоступных растениям. В условиях степи, хотя в почвах нет недостатка в Na, растения его поглощают слабо вследствие своей фосфор-калий-кальциевой специали-

зации и присутствия в почвенных растворах повышенного количества Са (антагониста натрия), а также Mg — элемента-биофила.

Таблица 1
Содержание химических элементов в растениях фона

Элемент	Лапчатка (листья и стебель), $n=5$, зола — 8,2%		Тополь (листья), $n=5$, зола — 8,7%		Сосна (хвоя), $n=6$, зола — 2,7%	
	min-max	M	min-max	M	min-max	M
Содержание химических элементов, % от золы						
Si	9,78–10,38	10,08	2,53–4,72	3,62	1,24–2,30	1,60
Al	1,92–2,45	2,01	0,17–0,35	0,21	0,27–0,98	0,73
Ca	15,18–15,78	15,48	17,53–24,61	21,06	13,67–15,10	14,51
Mg	2,46–2,99	2,72	2,33–2,90	2,66	2,53–2,94	2,67
K	5,54–5,84	5,69	11,52–17,05	14,27	15,46–22,11	18,30
P	1,32–1,64	1,53	2,18–2,54	2,36	5,64–6,62	6,13
Na	0,20–0,23	0,22	0,14–0,17	0,16	0,13–0,26	0,19
Fe	1,10–1,17	1,14	0,15–0,18	0,17	0,19–0,29	0,25
Ti	0,11–0,15	0,13	0,041–0,090	0,066	0,030–0,028	0,05
Содержание химических элементов, мг/кг золы						
F	80–120	100	115–135	120	150–190	180
Mn	672–1973	1322	364–471	417	8740–12116	9950
Sr	500–884	727	940–979	959	276–443	348
Ba	650–859	784	96–197	146	143–162	151
Zn	168–259	214	228–378	303	804–1912	1457
Cu	52–60	56	48–67	57	101–138	117
Ni	21–23	21	31–40	35	38–42	40
Cr	28–33	30	5–8	6	11–14	12
Co	16–28	22	25–53	39	16–27	23
Pb	35–38	36	34–36	35	10–21	17
V	21–26	23	63–72	69	18–25	22

Примечание: 1) min-max — диапазон размаха концентраций химических элементов, 2) M — средние значения концентраций.

Потенциальное загрязнение растений оценивалось методом сравнительного анализа химического состава твердого малорастворимого и растворимого техногенного вещества снеговой воды зоны загрязнения с составом золы растений фона, который показал преобладание в твердом веществе следующей ассоциации элементов (в нижнем индексе Кс): $F_{51,1-90,0}Al_{18,2-174}Ni_{14,4-27,3}Na_{4,6-6,42}V_{3,8-12,0}Fe_{2,4-16}Cr_{2,1-10,0}Ti_{1,8-8,0}Si_{2,6-6,0}$, в жидкой фазе — $F_{101,9-183,5}Na_{4,7-6,5}Al_{3,6}$. По отношению к растениям главными загрязнителями являются F, Al, Ni и Na, также как в случае с почвой и почвенными растворами.

Относительно растений фона растения техногенной зоны обогащены $F_{8,6-20,8}Ni_{2,0-4,5}Al_{1,6-1,7}$ (табл. 1, 2). Для каждого вида растений ряды Кс разные: лапчатка — $F_{14,3}Ni_{4,5}Al_{1,6}$; тополь — $F_{20,8}Fe_{8,0}Zn_{2,1}Al_{1,6}$; сосна — $F_{8,6}Al_{6,0}Fe_{3,7}Na_{3,4}Pb_{2,6}Ba_{2,0}V_{1,9}$. Судя по величинам Кс наибольшую чувствительность к разнообразию химических элементов в окружающей среде проявляет сосна обыкновенная. Менее значительные изменения в химическом составе растений произошли в области их рассеяния. Для лапчатки $Kr = Si_{3,5}Ti_{2,3}Na_{1,7}$. У тополя он варьирует около 1 для всех анализируемых элементов, у сосны заторможено поглощение только марганца ($Kr = 3,1$). Следовательно, коэффициент трансформации (Z_v) формируется преимущественно из величин Кс и характеризуется следующими значениями: лапчатка — 27, сосна — 25, тополь — 32 у.е., что соответствует среднему уровню биогеохимической трансформации [Сорокина, 2013]. Ее особенность заключается в том, что из всех элементов, поступающих в природную среду через атмосферу, ведущая роль в загрязнении растительности принадлежит токсичному фтору, который в повышенном количестве присутствует в валовой и водорастворимой форме в почвах и в виде газа в атмосфере.

Таблица 2

Содержание химических элементов в растениях зоны загрязнения

Элемент	Лапчатка (листья и стебель), $n=5$, зола — 8,2%		Тополь (листья), $n=5$, зола — 8,7%		Сосна (хвоя), $n=6$, зола — 2,7%	
	min-max	<i>M</i>	min-max	<i>M</i>	min-max	<i>M</i>
Содержание химических элементов, % от золы						
Si	2,74–2,87	2,84	2,53–4,32	3,84	2,72–4,97	4,28
Al	2,75–3,42	3,16	0,21–0,40	0,34	0,96–1,74	1,27
Ca	12,68–17,86	16,32	18,42–23,14	20,45	14,38–18,11	15,56
Mg	2,47–2,76	2,56	2,91–3,64	3,22	2,34–4,86	3,71
K	4,95–7,14	6,84	10,58–15,45	13,89	10,92–16,04	14,05
P	1,79–2,35	2,07	2,36–2,68	2,45	4,34–6,50	5,31
Na	0,10–0,15	0,13	0,12–0,16	0,15	0,21–1,70	0,64
Fe	0,61–1,09	0,85	0,96–1,52	1,36	0,69–1,29	0,94
Ti	0,04–0,07	0,06	0,06–0,09	0,08	0,05–0,07	0,06
Содержание химических элементов, мг/кг золы						
F	1140–1820	1430	2200–2700	2500	1225–2045	1547
Mn	458–921	889	410–625	585	1920–5544	3251
Sr	599–802	731	1300–1640	1530	223–412	322
Ba	972–1214	1098	146–197	182	149–481	297
Zn	262–286	275	520–710	640	672–1555	1015
Cu	44–78	67	57–84	67	106–221	164
Ni	73–115	94	28–43	30	44–109	81
Cr	16–54	25	5–8	7	19–24	22
Co	15–29	22	44–62	56	10–26	18
Pb	33–91	51	23–54	41	33–52	45
V	28–41	31	68–90	70	31–60	41

Количество фтора в растениях суши невелико и зависит от вида и места произрастания [Кабата–Пендиас, Пендиас, 1989]. В местах, свободных от действия производств, максимальный показатель содержания фтора в зеленых частях рас-

тений (в зависимости от вида) составляет 10–20 мг/кг сухой массы, т. е. 0,001–0,002 %. В некоторых случаях эти значения еще ниже, например, в хвое ели — 4–8 мг/кг, в некоторых кормах — 5–10 мг/кг. Если эти показатели будут превышены, можно говорить о воздействии фторсодержащих веществ. Примерная концентрация фтора в листьях (по обобщенным данным) для видов многолетних трав в нормальных пределах составляет 5–30 мг/кг сухой массы, токсичная — 50–500 [Gough, Shacklette, Case 1979; Devis, Beckett, Vollan, 1978].

Повышенное содержание фтора (до 100–150 мг/кг сухого вещества) в травянистой биомассе на исследуемой территории было обнаружено еще в 1990–1991 гг., когда завод работал не на полную мощность всего пять лет [Сараев, Харахинова, 1992]. В соломе пшеницы (9 км к СВ) элемента-токсиканта содержалось от 10 до 30 мг/кг, тогда как фоновое содержание варьировало от 0,02 до 5–6 мг/кг сухого вещества. С течением времени фторидное загрязнение растительности увеличивалось. Так, если в 1994 г. повышенное содержание фтора обнаруживалось в живых корнях на глубине 10 см, то в 1997 г. — на глубине 30 см. По сравнению с 1991 г. его содержание в разнотравье отличалось от контроля в 5–7 раз [Щетников, Зайченко, 2000].

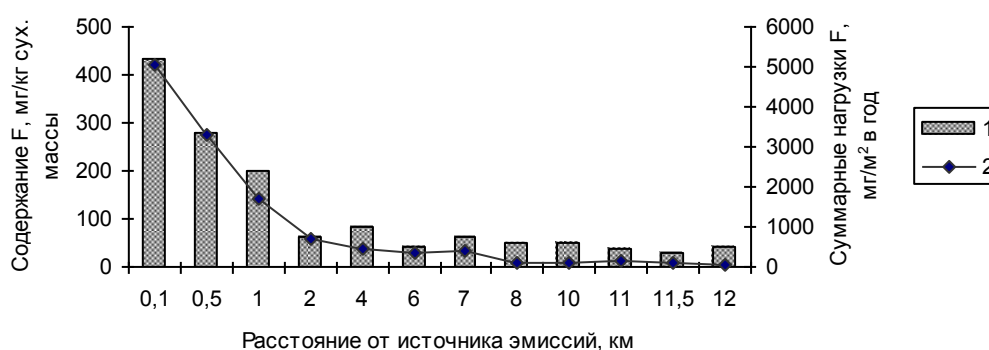


Рис. 1. Содержание фтора в лапчатке длиннолистной (1) ландшафтно-геохимического профиля территории загрязнения и его суммарные нагрузки (2)

Данные проведенных исследований также показали существенное увеличение содержания фтора в растениях как по сравнению с фоном, так и с ПДК (30 мг/кг сухой массы) [Временный..., 1987]. Для выявления тесноты связи между нагрузками фтора, его содержанием в почве и растениях проведен парный корреляционный анализ. Установлена зависимость накопления приоритетных поллютантов в растениях от количества их поступления в ландшафты. Наиболее наглядно это проявляется на примере поглощения F лапчаткой длиннолистной, которая является «проходным» по всему ландшафтно-геохимическому профилю видом и накапливает достаточно большое его количество (рис. 1) без каких-либо видимых морфологических изменений [Давыдова..., 2016]. При этом выявилась очень тесная положительная взаимосвязь ($r = 0,99$) между нагрузками F и его содержанием в данном виде растений, величины которых уменьшаются с удалением от заводов. Некоторое нарушение указанной взаимосвязи происходит за счет влияния увалистого рельефа, распределяющего потоки поллютантов. С расстоянием

соотношение нагрузок фтора, поступающего в составе твердого малорастворимого вещества и в составе раствора, меняется. Так, если вблизи заводов нагрузки растворимых фторидов превышают твердые фториды в 1,5 раза, то на расстоянии 6 км и далее это соотношение увеличивается (от 1,5 до 5,2), что связано, по всей вероятности, с большей летучестью газообразных соединений фтора и мелкодисперсной пыли, которые легкодоступны растениям.

Распределение содержания фтора в зеленой фитомассе и в почвах (рис. 2) также показало тесную положительную взаимосвязь ($r = 0,98$). В свою очередь уровни содержания фтора в почве напрямую зависят от его нагрузок ($r = 0,97$).

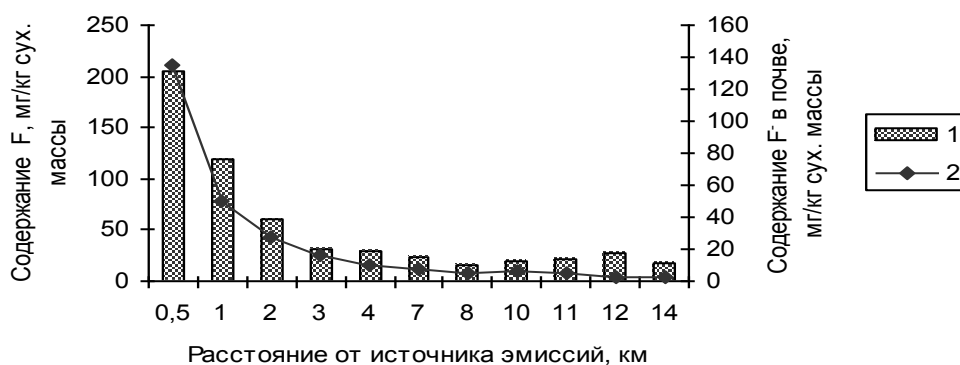


Рис. 2. Содержание фтора в надземной зеленой фитомассе (1) и в почве (водорастворимая форма) территории загрязнения

Концентрации фтора в надземной зеленой фитомассе выше 2–3 ПДК обнаружены на расстоянии до 8 км от алюминиевых заводов; количество, равное ПДК и выше, — на расстоянии 9–11 км в В-СВ направлении (рис. 3).

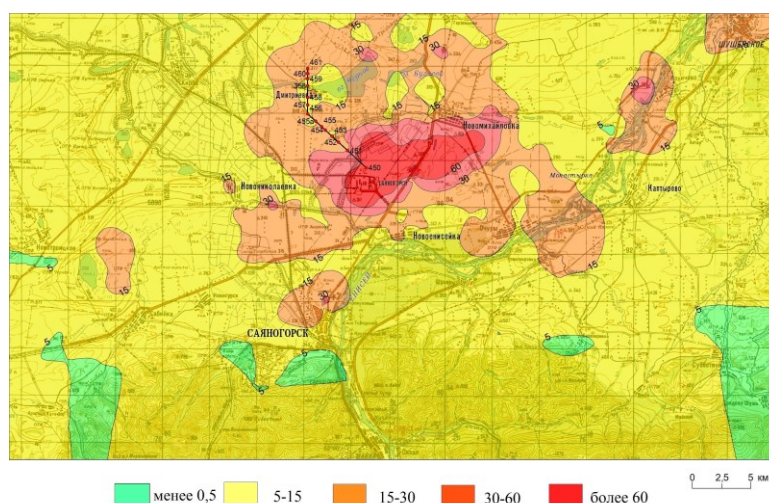


Рис. 3. Содержание фтора в зеленой надземной фитомассе (мг/кг сухой массы) территории, прилегающей к заводам ОАО РУСАЛ «Саяногорск». 450–461 номера площадок отбора проб лапчатки длиннолистной

Установлено, что различные группы растений неодинаково реагируют на содержание фтора в окружающей среде. Среди естественных трав к накоплению данного элемента предрасположены полукустарнички, грубое разнотравье, мхи и лишайники. Отдельные виды растений с содержанием фтора до 29 мг/кг встречаются на удалении 10–15 км от заводов. Особенно большое количество фтора накопилось в листоватых лишайниках и зеленых мхах — 226 и 280 мг/кг соснового бора, находящегося в 8 км к ЮЗ от заводов (с. Очуры), что подтверждает присутствие газообразного фтора в воздухе.

Среди загрязнителей, воздействующих на растения, фтор относится к числу сильнейших фитотоксикантов. Он влияет на метаболизм растений и способен вызывать снижение темпов поглощения кислорода, расстройство респираторной деятельности, снижение ассимиляции питательных веществ, уменьшение содержания хлорофилла, подавление синтеза крахмала, разрушение ДНК и РНК, ингибирование ферментов [Илькун, 1978; Садыков и др., 1985; Хальбваш, 1998]. В растительной клетке процесс детоксикации фтора происходит не всегда. По этой причине он, как яд, способен накапливаться в тканях растений в возрастающем количестве даже в том случае, когда концентрация его в воздухе будет существенно ниже предельно допустимых значений. Поступающие через устьица в ткань газы могут связываться как органическими соединениями [Николаевский, 1979], так и минеральными нерастворимыми солями, что уменьшает активность элемента. Повреждаемость листьев зависит от суммарного содержания зольных элементов и увеличения их количества в процессе накопления фитотоксикантов [Илькун, 1978]. Еще Б. Б. Полюнов [1953] заметил, что растения, произрастающие на богатых почвах, содержат высокое количество минеральных веществ, удивляя своим цветущим видом и здоровьем, а на бедных — минимальное. Хвойные породы, отличающиеся низким содержанием веществ, обычно обитают на бедных оподзоленных почвах. Как оказалось, у них отмечается относительно слабое развитие запасающих тканей и соответственно недостаточное накопление резервных веществ [Рожков, Михайлова, 1989].

Следовательно, устойчивость растений к поступающему в ткань фтору будет зависеть (помимо всех приспособительных свойств) от способности организма переводить избыточное содержание фтора в нерастворимые, не участвующие в физиологических процессах формы, то есть от наличия в тканях растений элементов с высокой осаждающей способностью [Павлов 1998]. Установлено, что с увеличением повреждения возрастает количество вымываемого фтора. Это свидетельствует о том, что гибель организма наступает после полного связывания фтором свободных ионов, то есть истощения буферных свойств организма, когда количество поступающих ионов фтора превышает способность данного растения обезвредить их.

Для исследуемой территории установлены ряды устойчивости растений в зависимости от их зольности и способности к поглощению фтора: 1. Высокоустойчивые (интенсивно поглощающие при высоком уровне зольности > 8%) — подорожник большой (*Plantago major* L.), донник ароматный (*Melilotus suaveolens* Ledeb.), лапчатка длиннолистная, полынь холодная (*Artemisia frigida* Willd.), полынь сизая (*Artemisia glauca* Pall. Ex Willd.), тополь бальзамический, вяз приземистый, перисто-ветвистый (*Ulmus pumila* L.). 1а. Высокоустойчивые (слабопоглощающие при среднем уровне зольности — 7–8%) — типчак (*Festuca valesiaca*

Schleichex. Gaudin), тонконог гребенчатый (*Koeleria cristata* L.), мятлик оттянутый (*Poa attenuate* Trin.).

2. Устойчивые (умеренно поглощающие при среднем уровне зольности — 7–8%) — скабиоза бледно-желтая (*Scabiosa ochroleuca* L.), клубника (*Fragaria viridis* Duch.), овсец Шелля (*Helictotrichon schellianum* (Hack) Tzevel.), вострец ложнопырейный (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzevel.), змеевка растопыренная (*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng.), карагана карликовая (*Caragana pygmaea* L.).

3. Среднеустойчивые (умеренно поглощающие при пониженной зольности — 5–6%) — ковыль Крылова (*Stipa krylovii* Roshev.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), береза повислая [*Betula pendula* Roth (*B. Verrucosa* Ehrh.)].

4. Крайне неустойчивые (интенсивно поглощающие при низкой зольности — менее 4%) — уснея нитевидная (*Usnea utilissima* Stirt.), уснея хохлатая (*Usnea comosa* Ach. RÖhl.), пармелия козья (*Parmelia caperata* (L.) Ach.), гипогимния вздутая (*Hypogymnia physodes* L.), сосна обыкновенная, кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour.).

Исследования показали, что в условиях загрязнения атмосферы ряд устойчивости, составленный на принципах детоксикации, соответствует действительности, если другие параметры, такие как влажность и температура почвы и воздуха, для них привычны (оптимальны). Например, ель устойчивее при наличии влажного субстрата (берега рек, понижения) и менее — в отсутствии таковых. Сосновые насаждения выровненных поверхностей более устойчивы по сравнению с насаждениями, произрастающими на инсолируемых склонах. Наиболее сильное поражение сосны отмечено в жаркие сухие дни. Поверхностная корневая система осины снижает ее сопротивляемость в условиях загрязнения в сухие годы.

Одним из результативных средств, повышающих устойчивость растений к воздействию атмосферных загрязнителей, является внесение удобрений, которые ослабляют их ингибирующее действие [Гудериан, 1979].

Фтор относится к эссенциальным (жизненно необходимым) элементам, которые участвуют в метаболизме организма и не могут быть заменены другими для выполнения биохимической роли [Жаворонков и др., 1999; Баргальи, 2005], но в большом количестве они токсичны. Из наблюдений и опытов известно, что фтористые интоксикации у животных проявляются в основном вследствие поступления фтора с пищей и в значительной мере из-за вдыхания зараженного воздуха [Садыков и др., 1985].

Отмечено, что содержания поллютанта в сырой зеленой массе кормовых растений на всем протяжении исследуемого ландшафтно-геохимического профиля имеют повышенные значения, превышающие ПДК для этого вида кормов. На расстоянии 12 км от источника эмиссий концентрации элемента достигают 4,2 мг/кг, что в 2,5 раза превышает допустимый уровень (1,5 мг/кг в траве натуральной влажности) [Временный..., 1987].

Повышенное содержание элемента в сене обнаруживается на расстоянии до 3,5–5,0 км от источника эмиссий (у завода в диапазоне — 150–300 мг/кг). Далее по профилю концентрации постепенно снижаются и составляют 0,5–0,7 ПДК (30 мг/кг сухого вещества) [Временный..., 1987]. В ходе исследований установлено, что проводить сенокошение для заготовки на корм животным возможно за пределами 5-километровой зоны от Саяногорского и Хакасского заводов по произ-

водству алюминия, а в некоторых местоположениях и дальше. Постоянный выпас животных на этой территории в летний период может привести к интоксикации их организма.

В нормально функционирующей биологической системе осуществляются закономерные и упорядоченные этапы поступления микроэлементов, их утилизации и элиминации. Если этот процесс нарушается, возникают различные заболевания, названные микроэлементами. В случае дефицита эссенциальных (жизненно необходимых) микроэлементов проявляются симптомы болезни недостаточности. Напротив, при избыточном количестве микроэлементов в среде (положительные аномалии) возникают болезни и синдромы интоксикации. При дисбалансе химических элементов в окружающей среде в организмах также возникают различные заболевания [Ковальский, 1974]. Такое взаимоотношение со средой распространяется на все живое [Жаворонков и др., 1999].

Выводы

1. Нарастание производственных мощностей выпуска продукции заводами по производству алюминия способствует увеличению наиболее опасной растворимой формы загрязняющих веществ, что свидетельствует о недостаточной очистке газообразной составляющей выбросов. Это диагностируется по значительному увеличению площади загрязнения растительности фтором до 1 ПДК по сравнению с почвами.

2. Установлено, что большинство видов, распространенных на исследуемой территории, относится к рядам устойчивых и высокоустойчивых растений к воздействию фторсодержащих эмиссий.

3. Относительно растений фона растения зоны загрязнения обогащены фтором, никелем и алюминием ($F_{8,6-20,8}Ni_{2,0-4,5}Al_{1,6-1,7}$). Выявлено, что содержание фтора в сырой зеленой массе растений в радиусе 12 км имеет повышенные значения, превышающие ПДК (до 4,2 мг/кг, что в 2,5 раза превышает допустимый уровень). Повышенное содержание элемента в сене обнаруживается на расстоянии до 10–15 км от источника эмиссий (максимально у завода — 315 мг/кг). С увеличением расстояния концентрации постепенно снижаются и составляют 0,5–0,7 ПДК.

4. Проводить сенокошение для заготовки корма животным и в зимний период возможно за пределами 5–10-километровой зоны в СВ-В-ЮВ направлениях от Саяногорского и Хакасского алюминиевых заводов, а в некоторых местоположениях и дальше. Постоянный выпас животных летом на территории ближе указанного расстояния может привести к интоксикации их организма.

5. В целом 30-летнее воздействие пылегазовых эмиссий на степные ландшафты привело к формированию биогеохимической фторидной аномалии, что прослеживается за пределами санитарной зоны. Приоритет в большей степени принадлежит Саяногорскому заводу по производству алюминия, нежели Хакасскому, поэтому мероприятия, направленные на улучшение технологий по снижению объема выбросов газообразных и твердых фторидов в атмосферу, необходимо провести прежде всего на указанном предприятии.

Литература

- Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений. М.: ГЕОС, 2005. 457 с.
Вернадский В. И. Живое вещество. М.: Наука, 1978. 358 с.

Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках № 123-4/281-7. М., 1987.

Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 2007. 350 с.

Гришина Л. А., Самойлова Е. М. Учет биомассы и химический анализ растений. М.: Изд-во МГУ, 1971. 99 с.

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

Давыдова Н. Д., Знаменская Т. И., Лопаткин Д. А. Ландшафтно-геохимический подход в решении проблем загрязнения природной среды // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 3. С. 449–458.

Давыдова Н. Д. Транслокация техногенного фтора в растения степей юга Минусинской котловины // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 173–177.

Добровольский В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 442 с.

Жаворонков А. А., Михалева Л. М., Авцын А. П. Микроэлементозы – новый класс болезней человека, животных, растений // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии (Труды биогеохим. лаб.). М.: Наука, 1999. Т. 23. С. 183–225.

Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев, 1978. 246 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.

Ковальский В. В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 280 с.

Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 264 с.

Николаевский В. С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск, 1979. 280 с.

Определитель растений юга Красноярского края. Новосибирск: Наука, 1979. 672 с.

Павлов И. Н. Изучение сорбции фтора в листьях древесных растений // Химия растительного сырья. 1998. № 2. С. 37–43.

ПНДФ 16.1:2.3:3-11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. М., 2005. 28 с.

Полынов Б. Б. Избранные труды. Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 447 с.

РД 52.24.360-2008. Массовая концентрация фторидов в водах. Методика выполнения измерений потенциометрическим методом с ионселективным электродом. Ростов н/Д., 2008. 25 с.

Рожков А. С., Михайлова Т. А. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья. Новосибирск: Наука, 1989. 156 с.

Некоторые экологические последствия техногенных выбросов фтора / О. Ф. Садыков [и др.] // Проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду. М.: Наука, 1985. С. 43–52.

Сараев В. Г., Харахинова С. И. Уровни содержания фтора в почвах и биологических объектах Южно-Минусинской котловины при воздействии алюминиевого завода. Новосибирск, 1992. 57 с.

Сорокина О. И. Тяжелые металлы в ландшафтах г. Улан-Батора: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2013. 144 с.

Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 339 с.

Хальбваш Г. Реакция организмов высших растений на загрязнение атмосферного воздуха двуокисью серы и фторидами. Австралия: Изд-во Ин-та ботаники, 1998. С. 217–220.

Щетников А. И., Зайченко О. А. Длительная динамика биотических и почвенно-геохимических параметров степных геосистем юга Сибири // География и природ. ресурсы. 2000. № 2. С. 73–80.

Gough L. P., Shacklette H. T., Case A. A. Element concentrations toxic to plants, animals, and man // Geological Survey Bulletin 1466. Washington, 1979. 80 p.

Devis R. D., Beckett P. H. T., Vollan E. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley // Plant Soil. 1978. Vol. 49. P. 395–408.

BIOGEOCHEMICAL TRANSFORMATION OF STEPPE VEGETATION IN ATMOSPHERIC POLLUTION CONDITIONS

N. D. Davydova

Nina D. Davydova

Dr. Sci. (Geogr.), Prof.,

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS,

1 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia

E-mail: davydova@irigs.irk.ru

In the steppes the affect of atmospheric pollution on grassy vegetation is not visually observed, as it is in the case of coniferous tree species of the taiga zone. But the seeming prosperity of the steppe is deceptive. The results of the quantitative chemical analysis confirm this fact. In the article we have presented data on 20 chemical elements. Information on the chemical composition of different plant species in the background area is compared with analogous plants in the zone of atmospheric pollution, where F, Na, Al, Ni have been identified as the main pollutants. We consider fluoride ion to be the most abundant element with a high toxicity. Its content is from 0.5 to 6.0 TLV and the extent area — about 250 km². A map of the dominant pollutant, fluorine, in the aboveground green phytomass of steppe landscapes is presented. Based on the theory of mineral detoxification of pollutants in plant cells and according to the level of mineral salts (ash) content, as well as fluorine content in herbaceous plants, lichens, needles and tree leaves, we have determined the resistance of a number of plants to atmospheric pollution by fluorine.

Keywords: plants; pollutants; atmospheric content; environmental stability; loads.