

УДК 504.05/06:504.7

ТРАНСЛОКАЦИЯ ТЕХНОГЕННОГО ФТОРА В РАСТЕНИЯ СТЕПЕЙ ЮГА МИНУСИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Давыдова Н.Д.

ИГСО РАН «Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН»,
Иркутск, e-mail: davydova@irigs.irk.ru

Представленный в работе материал касается изменения химического состава растительности под воздействием нагрузок техногенных веществ, поступающих от алюминиевых заводов через атмосферу. Показано, что по сравнению с приоритетными поллютантами, к которым отнесены алюминий, натрий и никель, более значительная роль в загрязнении растений принадлежит фтору – элементу высокой химической активности, обладающему по отношению к почвенной биоте токсичностью (I класс опасности) и в большом количестве поступающему на почвенный покров. В условиях повышенных концентраций токсиканта в атмосфере и почвах отмечена его активная транслокация в растения. В зеленой надземной фитомассе исследуемой территории его содержание меняется от 200–150 у заводов до 15–10 мг/кг сухой массы вещества на периферии, что отражено на карте М 1:250 000. Лапчатка длиннолистная (*Potentilla longifolia* Willd.), используемая в качестве биоиндикатора, также показала уменьшение аккумуляции фтора от 450 до 20 мг/кг сухой массы с удалением от источника эмиссий. Все это свидетельствует о причастности алюминиевых заводов к поставке фтора на прилегающую территорию в количествах, превышающих допустимые нормы, которые отрицательно сказываются на качестве заготавливаемых кормов в виде сена и скармливаемой травы на пастбищах далеко за пределами санитарной зоны.

Ключевые слова: поллютанты, фтор, техногенные нагрузки, биота, биоиндикация, зеленая фитомасса

TRANSLOCATION OF TECHNOGENIC FLUORINE IN PLANTS OF THE MINUSINSK DEPRESSION SOUTH STEPPES

Davydova N.D.

IG SB RAS, «V.B. Sochava Institute of geography» of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Science, Irkutsk, e-mail: davydova@irigs.irk.ru

The material provided in work concerns change of a chemical composition of vegetation under the influence of loadings of the technogenic substances arriving from aluminum plants through the atmosphere. It is shown that in comparison with priority pollutant to which aluminum, sodium and nickel are carried more significant role in pollution of plants belongs to fluorine – an element of high chemical activity, possessing in relation to a soil biota toxicity (the I class of danger) and in bigger quantity arriving on a soil cover. In the conditions of the increased concentration of a toxicant in the atmosphere and soils the active translocation in plants is noted him. In the green elevated phytomass of the researched territory its content changes from 200–150 at plants to 15–10 mg/kg of dry mass of substance on the periphery that is reflected in the card M 1:250 000. Long-leaves-silverweed (*Potentilla longifolia* Willd.) used as the bioindicator also I have shown reduction of accumulation of fluorine from 450 to 20 mg/kg of dry weight with removal from a source of issues. All this testifies to participation of aluminum plants in supply of fluorine to the adjacent territory in the quantities exceeding admissible regulations which have an adverse effect on quality of the prepared forages in the form of hay and the fed grass on pastures is far outside a sanitary zone.

Keywords: pollutant, fluorine, technogenic loadings, biota, bioindication, green phytoweight

Для наращивания биологической массы растениям необходим строительный материал, который зародившиеся проростки извлекают из воздуха и субстрата. В.И. Вернадский [1] рассматривал химический состав как устойчивый признак живых организмов. В развитие его идей А.П. Виноградов [2] показал, что в процессе эволюции способность поглощать те или иные химические элементы в зависимости от местообитания закрепляется в живых организмах генетически и передается по наследству. В дальнейшем эта способность получила название биогеохимической специализации. Такое взаимоотношение у растений со средой формируется в нормальных

естественных условиях. В случаях, когда растения оказываются в геохимических аномалиях (природных или техногенных), чтобы выжить им приходится приспосабливаться. Для этого растения обладают различными защитными свойствами, а также имеют различные механизмы поглощения химических элементов – безбарьерный и барьерный [3]. В случае безбарьерного поглощения обобщенным показателем их ответной реакции на недостаток или избыток химических элементов в среде обитания служит продуктивность. Установлено, что физиологический барьер может сдерживать пресс токсических веществ в определенных рамках концентраций, которые

не одинаковы для разных видов растений. Увеличение концентрации в среде обитания выше предела переносимости токсичности элемента растением может привести к разрушению физиологического барьера, что сопровождается угнетением роста и развития, уменьшением их продуктивности.

Цель исследований – провести оценку изменения геохимических условий среды обитания и ответной реакции растений степей юга Минусинской котловины, находящихся в условиях атмосферного загрязнения выбросами предприятий алюминиевой промышленности.

Материалы и методы исследования

Сбор полевых материалов и оценка влияния пылегазовых эмиссий на компоненты геосистем проводились по широкой комплексной программе, основанной на принципах и методах геохимии ландшафта.

Объект исследования – степные геосистемы юга Минусинской котловины, подверженные в течение 30 лет воздействию пылегазовых эмиссий Саяногорского и Хакасского алюминиевых заводов, выпускающих в год более 800 тыс. т алюминия.

Сначала по накоплению массы техногенного вещества в снежном покрове определялась общая площадь загрязнения территории, прилегающей к алюминиевым заводам, выявлялись приоритетные элементы-загрязнители и определялись их нагрузки [4]. Далее исследовался почвенно-растительный покров на содержание поллютантов. С этой целью было заложено 480 площадок, на которых параллельно с почвами отбирали надземную зеленую фитомассу рамочным методом с площади 0,25 м² в 3-кратной повторности. Кроме этого использовали отдельные виды древесных растений, в качестве которых были выбраны встречающиеся на исследуемой территории – тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Травяные смеси – укосы анализировались преимущественно на содержание фтора.

Для более углубленных исследований в зоне загрязнения был заложен ландшафтно-геохимический профиль, ориентированный по отношению к заводам на север и северо-восток. Выбор направления обусловлен тем, что на относительно коротком расстоянии профиль сечет все выделенные зоны загрязнения, в том числе участок ветровой тени, и характеризуется наибольшими перепадами высот. На данном ключевом участке кроме 13 смешанных образцов зеленой надземной фитомассы отобрано – 13 смешанных образцов лапчатки длиннолистной, клейкой (*Potentilla longifolia* Willd.), которая использовалась в качестве индикатора на загрязнение поллютантами.

Количественный химический анализ золы растений выполнялся в сертифицированном химико-аналитическом центре Института географии им. В.Б. Соचाва СО РАН с использованием приборной базы Байкальского центра коллективного пользования и стандартизированных методик. Пробы анализировались на содержание 20 элементов – Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, Mn, P, F, Sr, Ba, Zn, Cu, Ni, Cr, Co, Pb, V.

Содержание фтора выявлялось методом прямой потенциометрии на иономере «Эксперт-001» с помощью фторселективного электрода ЭЛИС 131F после

сплавления при температуре 850° смеси 1:5 образцов золы растений с K–Na углекислым и последующим растворением расплава в дистиллированной воде.

Биогеохимический фон территории исследования оценивался относительно средних значений химических элементов в растениях [5] с помощью коэффициента концентрации (Кк). Для оценки изменения уровней содержания отдельных элементов в растениях зоны загрязнения применялись коэффициенты концентрации ($K_c = C_a/C_\phi$) и рассеяния ($K_r = C_\phi/C_a$), где C_ϕ и C_a соответственно концентрации элемента в образцах растений фона и зоны загрязнения (техногенной аномалии). Коэффициенты концентрации использовались далее для расчета индекса суммарного загрязнения

$$Z_c = \sum^n K_c - (n-1),$$

где n – количество химических элементов с $K_c > 1,5$ [6]. Он является информативным показателем изменений полиэлементного геохимического фона каждого компонента и элемента в ландшафтах под давлением техногенного пресса. При санитарно-гигиенической оценке токсичности поллютантов использовались предельно допустимые концентрации (ПДК), химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Все анализируемые виды растений фона близки по химическому составу. Для них характерно преобладание кальция над кремнием, повышенное содержание стронция и пониженное натрия. Лапчатка длиннолистная выделяется достаточно высоким уровнем железа и бария, а сосна обыкновенная – фосфора, калия и цинка.

Сопоставление полученных результатов по содержанию элементов в растениях с данными Д.П. Малюги [5] также выявило указанную региональную особенность растений, связанную с повышенными концентрациями щелочноземельных элементов ($K_k = Ca_{4,8-7,0} Sr_{2,4-3,3} Ba_{1,5-1,9}$).

Сравнение химического состава твердого техногенного вещества снеговой воды с составом золы растений фона показал различия их химических составов в отношении следующих элементов, имеющих повышенные концентрации (в нижнем индексе K_c): $F_{51,1-90,0}$, $Al_{18,2-174}$, $Ni_{14,4-27,3}$, $Na_{4,6-6,42}$, $V_{3,8-12,0}$, $Fe_{2,4-16,2}$, $Cr_{2,1-10,0}$, $Ti_{1,8-8,0}$, $Si_{2,6-6,0}$ и пониженные (в верхнем индексе Kr) $P_{15,6-63,8}$, $K_{10,7-34,5}$, $Mn_{3,4-25,8}$, $Ca_{12,1-16,5}$, $Mg_{3,7-3,9}$. Из приведенных формул следует, что твердая малорастворимая часть техногенного вещества по сравнению с растениями фона обогащена преимущественно фтором, алюминием, никелем и натрием, которые могут явиться их потенциальными загрязнителями, и обеднена элементами биофилами – фосфором, калием, марганцем, кальцием и магнием. Реально

в зоне загрязнения это осуществляется, но на более низком уровне, так как привнесенное через атмосферу вещество рассеивается и трансформируется, смешиваясь с почвой. Растения зоны загрязнения по сравнению с растениями фона существенно обогащены фтором ($F_{14,3-20,8}$), меньше никелем ($Ni_{2,0-4,5}$) и алюминием ($Al_{1,6-1,7}$). Повышенное количество натрия ($Na_{3,4}$) обнаружено только в отношении сосны сибирской. Обеднение техногенного вещества биофильными элементами не повлияло на их содержание в растениях, вследствие достаточного их количества в почве.

Высоким содержанием фтора выделяется снеговая вода зоны загрязнения по отношению к золе растений фона, K_c которой меняется от 100 условных единиц до 150. Во время снеготаяния она просачивается в почву, поставляя в почвенные растворы фтор в доступной для растений ионной форме. В меньшем количестве отмечается присутствие натрия и алюминия.

Из приведенных данных следует, что по сравнению с алюминием, натрием и никелем более значительная роль в загрязнении растений принадлежит фтору – элементу высокой химической активности, обладающего по отношению к почвенной биоте токсичностью (I класс опасности) и в большом количестве поступающего на почвенный покров (рис. 1).

Для индикации воздействия фтора на растения в зоне рассеяния пылегазовых эмиссий использовалась лапчатка длиннолистная (липкая), которая является «проходным» по всему ландшафтно-геохимическому профилю видом и накапливает достаточно высокое количество фтора (до 450 мг/кг сухого вещества) без каких-либо видимых морфологических изменений. При этом выявилась очень тесная взаимосвязь ($r = 0,90$) между нагрузками фтора и его содержанием в данном виде растений (рис. 2), что позволяет отнести лапчатку длиннолистную к растениям с безбарьерным типом поглощения фтора.

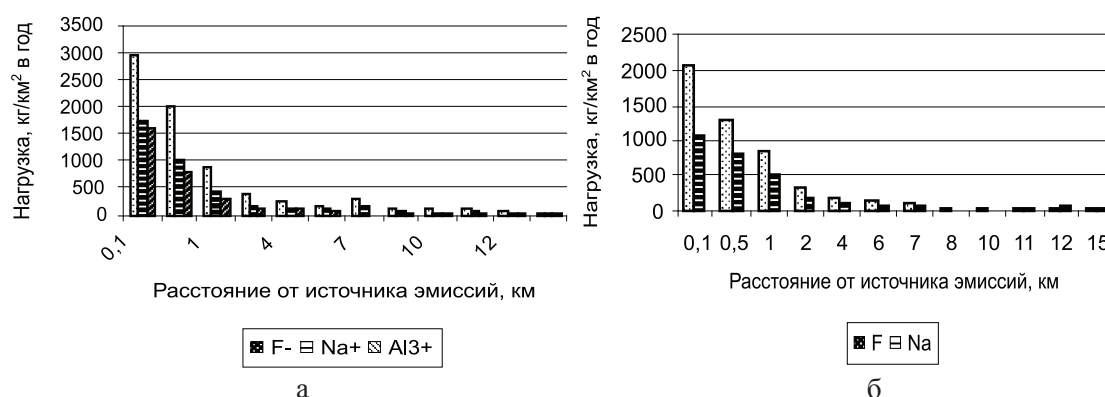


Рис. 1. Распределение нагрузок приоритетных поллютантов на территории, прилегающей к алюминиевым заводам, поступающим в составе: а – растворимого вещества; б – твердого вещества

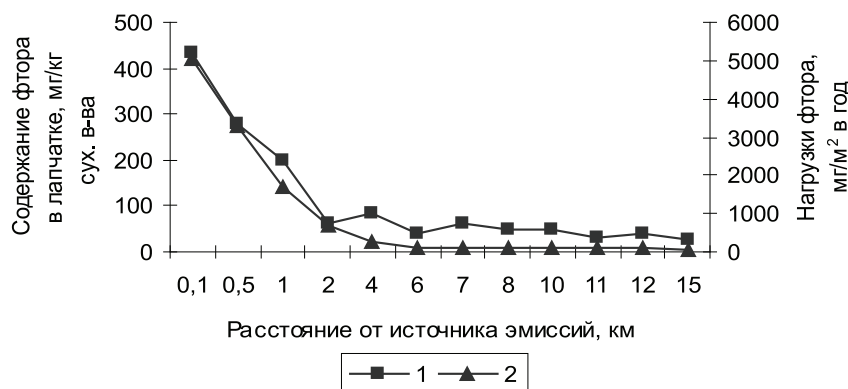


Рис. 2. Содержание фтора в лапчатке длиннолистной (мг/кг сухого вещества) (1) и его суммарные нагрузки на геосистемы (2)

Аккумуляция фтора в растениях зависит от наличия его подвижных соединений в окружающей среде и индивидуальных особенностей организма. Природный фтор малодоступен растениям, поэтому его содержание в растениях, обитающих в естественных условиях, невелико, хотя есть и исключения. Среднее содержание фтора в растениях составляет 0,1–5,0 мг/кг сухого вещества и может колебаться практически от нуля до нескольких сот миллиграммов. В местах, свободных от действия промышленных предприятий, максимальный показатель содержания фтора в зеленых частях растений (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 сосны 3–6 мг/кг, в некоторых кормах 5–10 мг/кг. По обобщенным данным для многолетних видов трав концентрация фтора в нормальных пределах составляет 5–30 мг/кг сухой массы, токсичная – 50–500 [10].

В зоне аэротехногенного загрязнения складывается ландшафтно-геохимическая обстановка с высокой доступностью фтора для растений, который присутствует в виде газа в атмосфере, в малорастворимой и хорошо растворимой в воде форме в почвах.

Повышенное содержание фтора (до 100–150 мг/кг сухого вещества) в травянистой биомассе было обнаружено уже в первые годы работы Саяногорского алюминиевого завода (1990–1991 гг.), когда завод проработал всего пять лет. В соломе пшеницы (9 км к С-В) элемента-токсиканта содержалось от 10 до 30 мг/кг, тогда как фоновое содержание не превышает 5–6 мг/кг сухого вещества [8]. Особенно много фтора накапливается в листоватых лишайниках (160–226) и зеленых мхах (230–280 мг/кг сухого вещества) соснового бора, находящегося в 8 км к юго-востоку от заводов, что подтверждает присутствие газообразного фтора в воздухе.

При взаимодействии со средой для жизнедеятельности человека очень важна роль химических элементов. В нормально функционирующей биологической системе нет хаоса микроэлементов, но есть закономерные и упорядоченные этапы поступления, 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 возникают болезни

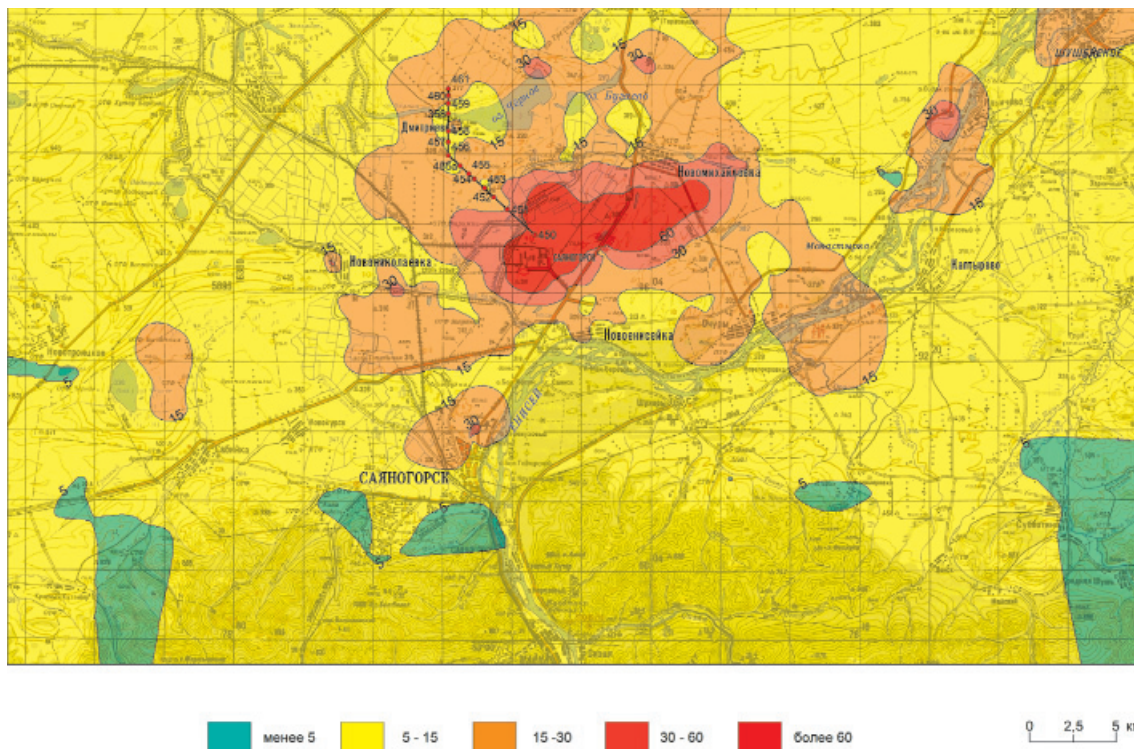


Рис. 3. Содержание фтора в зеленой надземной фитомассе (мг/кг сухого вещества) территории, прилегающей к алюминиевым заводам. 450–461 номера площадок отбора проб лапчатки длиннолистной по ландшафтно-геохимическому профилю

и синдромы интоксикации. При дисбалансе химических элементов в окружающей среде в организмах также возникают различные заболевания [9]. Такое взаимоотношение со средой распространяется на все живые организмы. При этом большое значение имеет миграция элементов по пищевой цепи. С целью оценки экологической опасности со стороны кормовой базы (начального звена пищевой цепи) для исследуемой территории была составлена карта уровней содержания фтора в травяном покрове (рис. 3).

Токсичные концентрации фтора от 2 до 6 ПДК (при ПДК = 30 мг/кг сухого вещества) обнаружены в зеленой надземной фитомассе территории в пределах 11 км в восточно-северо-восточном направлении от заводов и 1–2 ПДК далее – до 14 км. Если оценивать содержание фтора в сырой зеленой фитомассе, то опасная зона расширяется вследствие ужесточения ПДК до 1,5 мг/кг. На расстоянии 12 км от источника эмиссий концентрации элемента могут достигать 4,2 мг/кг, что в 2,5 раза превышает допустимый уровень.

Заключение

В общей сложности, судя по содержанию фтора в отдельных видах растений и зеленой надземной фитомассе, в условиях разной степени опасности находятся земли 9 сельскохозяйственных объединений. В наиболее неблагоприятных условиях расположены сенокосы и пастбища сел Новонисейка и Новомихайловка. Несколько лучшая ситуация сложилась для села Дмитриевка благодаря расположению в низине (в ветровой тени) и села Новониколаевка, находящегося с подветренной стороны. Со временем, если не принимать меры по сокращению объемов выбросов в атмосферу вследствие их возвращения на земную поверхность и аккумуляции поллютантов

в почвах и растениях, ситуация будет ухудшаться. Между тем никаких опознавательных или запретительных знаков на территории загрязнения не установлено. Местное население и животные, не опасаясь, свободно посещают зоны повышенной и высокой степени экологического риска – наблюдаются случаи сенокошения вблизи санитарной зоны (2,5 км), сбор дикоросов и выпас животных.

Список литературы

1. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. – М.: Наука, 1965. – 374 с.
2. Виноградов А.П. Основные закономерности в распределении микроэлементов между почвами, растениями и средой // Микроэлементы в жизни растений и животных. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – С. 7–20.
3. Ковалевский А.Л. О физиологических барьерах поглощения химических элементов растениями // Микроэлементы в биосфере и применение их в сельском хозяйстве Сибири и Дальнего Востока. – Улан-Удэ: Изд-во БФ СО РАН СССР, 1971. – С. 134–144.
4. Давыдова Н.Д., Знаменская Т.И., Лопаткин Д.А. Выявление химических элементов-загрязнителей и их первичное распределение на территории степей юга Минусинской котловины // Сибирский экологический журнал. – 2013. – Т. 20. – № 2. – С. 285–294.
5. Малога Д.П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 264 с.
6. Сает Ю.Е., Смирнова Р.С. Геохимические принципы выявления зон воздействия промышленных выбросов в городских агломерациях // Вопросы географии. – М.: Мысль, 1983. – Сб. 120. – С. 45–55.
7. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утвержденные ГУВ Госагропрома СССР 07.08.87 № 123-4/281-7).
8. Сараев В.Г., Харахинова С.И. Уровни содержания фтора в почвах и биологических объектах Южно-Минусинской котловины при воздействии алюминиевого завода. – Новосибирск: Деп. в ВИНТИ 03.08.1992. – № 2548–В92. – 57 с.
9. Жаворонков А.А., Михалева Л.М., Авцын А.П. Микроэлементозы – новый класс болезней человека, животных и растений // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. Труды биогеохимической лаборатории. – М.: Изд-во Наука, 1999. – Т. 23. – С. 183–225.
10. 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.