

УДК 632.151:546.16:633.511

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДУШНОГО ПЕРЕНОСА ФТОРА В СОСТАВЕ АЭРАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТЕНИЙ ХЛОПЧАТНИКА ДЛЯ ИНДИКАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2021 г. А. В. Литвинович<sup>1,\*</sup>, О. Ю. Павлова<sup>1</sup>, А. В. Лаврищев<sup>2</sup>, В. М. Буре<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 С.-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет  
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 6–9, Россия

\*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 13.09.2021 г.

Исследование листьев растений хлопчатника, возделываемого в зоне распространения выбросов предприятия по производству аммофоса, позволило установить возможность использования растений для индикации площади аэротехногенного загрязнения фтором. Установлено, что большая часть фтора легко удаляется с листовой поверхности после смыва дистиллированной водой. Выявлена взаимосвязь содержания фтора, накапливавшегося в составе техногенной пыли на листьях, и его концентрации в тканях. Разработаны эмпирические зависимости содержания фтора в смывых и не смывых листьях хлопчатника. Показано, что вид изученной эмпирической зависимости зависит от направления распространения ветра. Установлена связь количества фтора в смывых листьях хлопчатника и их зольностью при удалении от источника загрязнения.

*Ключевые слова:* моделирование процесса, воздушный перенос, фтор, аэральные выбросы, хлопчатник, индикация промышленного загрязнения.

DOI: 10.31857/S0002188121120061

### ВВЕДЕНИЕ

Фтор является одним из серьезных загрязнителей агроландшафта. Фтористые соединения, поступая в почву, изменяют их физико-химические и биологические свойства, нарушают нормальное функционирование растений. Проблема загрязнения окружающей среды техногенными соединениями фтора актуальна для многих промышленно развитых регионов [1].

Источниками поступления фтора в атмосферу являются предприятия алюминиевой промышленности [2], заводы по производству керамики, стекла, фосфорсодержащих удобрений [3]. Подсчитано, что при переработке 13 млн т фосфатных концентратов и руд ежегодно химически активизируется 1 млн т фтора [4]. Применение фосфорных удобрений и фосфогипса также способствует обогащению почв фтором [5, 6].

В лаборатории мелиорации почв АФИ (г. Санкт-Петербург, Россия) длительное время проводят

исследования, направленные на установление влияния фтора на компоненты агроценозов. Изучено воздействие аэральных выбросов предприятия по производству аммофоса на состав микробиоты, почву, растения и грунтовые воды [7–12]. Выявлено влияние различных видов минеральных удобрений на переход фтора в растения [9].

В исследованиях [13, 14] предпринята попытка использовать растения хлопчатника в качестве фитоиндикатора для картирования территории рассеяния аэропромвыбросов комбината по производству фосфорных удобрений. Следует подчеркнуть, что установление площади рассеяния техногенных выбросов заводов, расположенных в аридных регионах, встречает определенные трудности. Отсутствие устойчивого снежного покрова исключает возможность мониторинга загрязнения в зимний период времени. Ведение сельскохозяйственного производства в аридной зоне невозможно без проведения ирригационных мероприятий. Например, за вегетационный период

**Таблица 1.** Зольность листьев растений хлопчатника, г/100 г воздушно-сухой массы

| Расстояние от предприятия, км | Зольность не смытых листьев | Зольность смытых листьев | Разность |      |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------|------|
|                               |                             |                          | г        | %    |
| 0.6                           | 21.1                        | 19.1                     | 2.0      | 9.5  |
| 3                             | 21.4                        | 17.1                     | 4.3      | 20.1 |
| 5                             | 23.5                        | 21.2                     | 2.3      | 9.8  |
| 10                            | 22.6                        | 21.0                     | 1.6      | 7.1  |
| 15                            | 21.7                        | 20.6                     | 1.1      | 5.1  |
| 20                            | 20.9                        | 19.2                     | 1.7      | 8.1  |

возделывания хлопчатника проводят 6–7 поливов по бороздам. Это приводит к смыву и миграции в нижележащие слои почвенной толщи оседающих на поверхность поллютантов [15–17]. Дополнительным фактором перераспределения техногенных выпадений на поверхности почвы является ветроперенос. Цель работы – на основе данных содержания фтора на поверхности листьев и в тканях листа хлопчатника разработать эмпирические модели дальности воздушного переноса аэропромвыбросов предприятия по производству аммофоса. В задачи исследования входило: установить концентрацию фтора в листьях растений на разном расстоянии от источника загрязнения по розе ветров; выявить взаимосвязь содержания фтора в хлопчатнике при разной подготовке растительных проб; по мере удаления от комбината определить изменение зольности листовых пластинок растений от концентрации фтора в их тканях.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Завод по производству аммофоса (координаты: 39°39'33"N и 66°49'42"E) с ежегодным объемом газопылевых выбросов >10 тыс. т расположен в зоне сухих субтропиков. К предприятию прилегает территория активного хлопкосеяния. Вегетационный период хлопчатника длится 110–150 сут [18]. Степень сомкнутости крон хлопчатника к июлю, в зависимости от агротехники возделывания, составляет 40–93% [19]. Глубоко рассеченные листовые пластинки растений этой культуры хорошо удерживают пылевидный нанос. Незначительное количество осадков с мая по октябрь практически исключает возможность смыва техногенных частиц с поверхности листьев.

Почвенный покров участков, на которых отбирали пробы хлопчатника, представлен сероземно-оазисными староорошаемыми почвами на

агроирригационных отложениях (>1.5 м) [20]. Вне зависимости от расстояния до труб предприятия почвы характеризуются сходным химическим и гранулометрическим составом. Валовой химический состав: SiO<sub>2</sub> – 52–54.1, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3.4–3.8, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11.6–12.3, K<sub>2</sub>O – 2.3–2.9%. Гранулометрический – тяжелосуглинистый. Содержание фракций <0.001 мм – 17.5–19.2, <0.01 мм – 48.4–50.4%. Реакция почв щелочная: рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 7.7–8.2.

Образцы листьев хлопчатника отбирали на разном расстоянии (0.6–25 км) от предприятия по розе ветров в фазе бутонизации по всей высоте растений. В качестве контроля служили растения вне зоны досягаемости выбросов. Средняя проба включала 90 растений из каждого массива. Повторность пятикратная. Перед определением пробы растений усредняли. Агротехника возделывания хлопчатника на всей обследованной территории одинаковая. Уровень запыленности листовой поверхности хлопчатника определяли по разности между зольностью не смытых и смытых листьев. Озоление проводили в муфеле при температуре 550°C.

Для смыва 100 г свежих листьев использовали 100 мл дистиллированной воды. Содержание фтора устанавливали, анализируя смытые и не смытые листья с помощью фторселективного электрода в водной вытяжке. Перед анализом листья измельчали, доводя до тонкодисперсного состояния.

Математическую обработку данных проводили согласно [21].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе отбора растительных образцов обратили внимание на высокую запыленность листовой поверхности хлопчатника. При сжигании не смытых листьев, по сравнению со смытыми, выход золы оказался на 1.1–4.3 г/100 г сухой массы листьев больше. Максимальное запыление листьев установлено в 3-км зоне (табл. 1). Это согласовалось с данными исследования [22], в котором показано, что радиус максимального промышленного загрязнения приземного слоя атмосферы определяется высотой труб загрязнителя и равен ≈5–20 высотам труб.

В составе выбросов предприятий по производству фосфорсодержащих удобрений приоритетным загрязнителем является фтор. Источниками выбросов служат цеха по производству аммофоса и экстракционной фосфорной кислоты. В техногенной пыли цехов по производству аммофоса содержание фтора составляет 3.7%.

**Таблица 2.** Содержание фтора в листьях хлопчатника, мг/кг воздушно-сухой массы

| Направление   | Расстояние от предприятия, км |             |             |           |             |           |             |             |             |
|---------------|-------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|               | 0.6                           | 3           | 5           | 7.5       | 10          | 12.5      | 15          | 20          | 25          |
| Север         | –                             | <u>153</u>  | <u>29.4</u> | –         | <u>19.0</u> | –         | <u>8.4</u>  | <u>5.6</u>  | –           |
|               |                               | 41.3        | 10.5        |           | 6.8         |           | 3.7         | 1.6         |             |
| Северо-восток | <u>70.0</u>                   | <u>300</u>  | <u>50.0</u> | <u>40</u> | <u>23.0</u> | <u>20</u> | <u>21.0</u> | <u>18.5</u> | <u>12.2</u> |
|               | 17.5                          | 72.0        | 12.0        | 12        | 7.0         | 5.2       | 4.8         | 4.2         | 4.1         |
| Восток        | –                             | <u>16.9</u> | –           | –         | <u>10.4</u> | –         | <u>8.3</u>  | –           | –           |
|               |                               | 4.8         |             |           | 3.7         |           | 4.2         |             |             |
| Юго-восток    | –                             | <u>9.6</u>  | <u>7.6</u>  | –         | <u>7.4</u>  | –         | –           | –           | –           |
|               |                               | 3.7         | 3.4         |           | 2.8         |           |             |             |             |
| Запад         | –                             | <u>15.0</u> | <u>8.6</u>  | –         | –           | –         | –           | –           | –           |
|               |                               | 2.4         | 2.5         |           |             |           |             |             |             |
| Юго-запад     | <u>27.1</u>                   | <u>13.0</u> | <u>8.1</u>  | –         | –           | –         | –           | –           | –           |
|               | 6.4                           | 2.5         | 3.0         |           |             |           |             |             |             |
| Юг            | –                             | –           | –           | –         | <u>10.1</u> | –         | –           | –           | –           |
|               |                               |             |             |           | 2.9         |           |             |             |             |

Примечание. Над чертой – содержание фтора в не смытых листьях, под чертой – в смытых, прочерк – не определяли. Контроль вне зоны распространения выбросов – 6.8 мг/кг (не смытые листья).

Уровень загрязнения растений фтором в целом закономерно снижался по мере удаления от источника загрязнения (табл. 2). Площадь техногенного загрязнения вытянута от предприятия в направлении преобладающих ветров (север, северо-восток). По другим направлениям радиус меньше. Фтор оседает на листьях растений в составе техногенной пыли. Большая часть фтора легко удалялась при смыве листовой поверхности. Таким образом, общее содержание фтора, установленное при исследовании листьев хлопчатника, не отражало его токсического уровня. Проведенное исследование позволило сделать важный в практическом отношении вывод. Изучение химического состава растений следует проводить только после специальной подготовки растительных проб.

Разработку эмпирических моделей содержания фтора на листьях и в тканях листовой пластинки проводили в направлении преимущественного распространения ветров, поскольку только 2 направления (север и северо-восток) содержали достаточное количество наблюдений.

*Эмпирические модели содержания фтора в зависимости от расстояния от предприятия (направление северо-восток).* Данные, характеризующие содержание фтора в смытых и не смытых листьях в зависимости от расстояния до предприятия, носят сложный и нелинейный характер. Выделили 2 зоны: первая зона находится на расстоянии  $\leq 5$  км, вторая – на расстоянии  $> 5$  км от предприятия.

Для каждого из 2-х вариантов (смытые и не смытые листья) вначале производили логарифмирование исходных данных, далее строили эмпирическую модель на основе многочлена 2-й степени для 2-й зоны по 7-ми точкам (удаление от 5 км и более). После чего строили точную эмпирическую модель для 1-й зоны по 3-м точкам также на основе многочлена 2-й степени (3 неизвестных параметра) таким образом, чтобы построенные модели для 1-й и 2-й зон совпадали на границе (точка 5 км). Далее использовали экспоненту для построения объединенной эмпирической модели. При построении моделей 2–4 использовали аналогичный подход.

Эмпирическая модель содержания фтора для не смытых листьев (1) объединяет модели (1.1) и (1.2).

Модель (1.1) для 1-й зоны (расстояние  $\leq 5$  км от предприятия) имеет вид:

$$y_{1.1} = \exp(3.259 + 1.8576x - 0.3476x^2), \quad (1.1)$$

где  $x$  – расстояние от предприятия.

Модель (1.2) для 2-й зоны (расстояние  $> 5$  км от предприятия) имеет вид:

$$y_{1.2} = \exp(4.511 - 0.1442x + 0.0027x^2), \quad (1.2)$$

где  $x$  – расстояние от предприятия.

Модель (1.2) оказалась статистически значимой на высоком уровне значимости 1% (статистика  $F = 18.46$  при критической величине  $F(0.99, 2, 6) = 18$ ). Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.9$ .

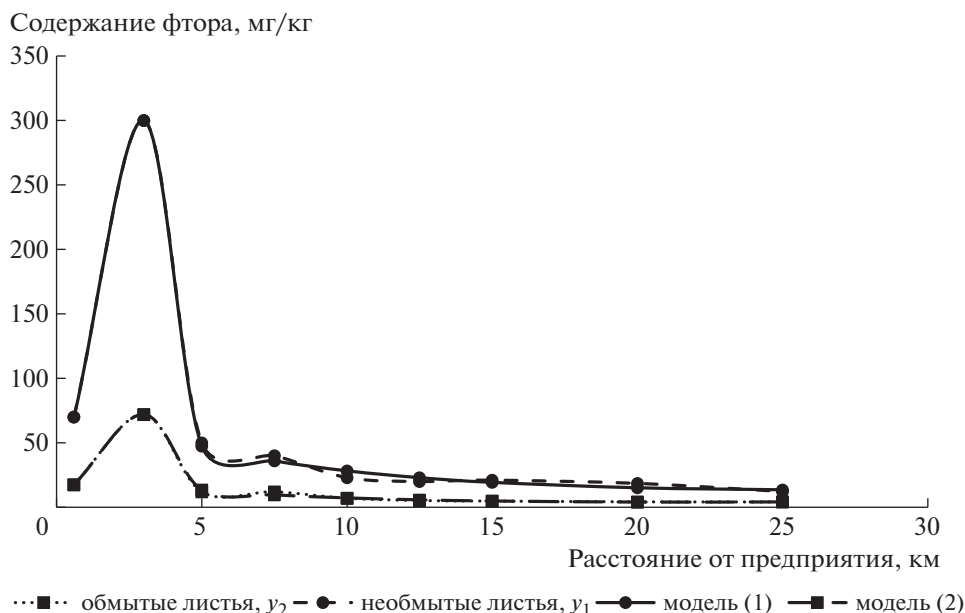


Рис. 1. Содержание фтора в смываемых и не смываемых листьях хлопчатника (направление северо-восток).

Эмпирическая модель (1.1) является точной, на границе зон (точка 5 км) модели совпадали. График модели (1) приведен на рис. 1.

Эмпирическая модель содержания фтора для смываемых листьев (2) объединяет модели (2.1) и (2.2). Модель (2.1) для 1-й зоны (расстояние ≤ 5 км от предприятия) имеет вид:

$$y_{2.1} = \exp(1.924 + 1.7586x - 0.3248x^2), \quad (2.1)$$

где  $x$  – расстояние от предприятия.

Модель (2.2) для 2-й зоны (расстояние > 5 км от предприятия) имеет вид:

$$y_{2.2} = \exp(3.431 - 0.1882x + 0.0043x^2), \quad (2.2)$$

где  $x$  – расстояние от предприятия.

Модель (2.2) оказалась статистически значимой на высоком уровне значимости 0.5% (статистика  $F = 32.04$  при критической величине  $F(0.995, 2, 6) = 26.28$ ). Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.94$ . Эмпирическая модель (2.1) является точной, на границе зон (точка 5 км) модели совпадали. График модели (2) приведен на рис. 1.

Эмпирические модели содержания фтора в зависимости от расстояния от предприятия (направление север). Эмпирическая модель (3) содержания фтора для не смываемых листьев:

$$y_3 = \exp(5.7 - 0.39x + 0.01x^2), \quad (3)$$

где  $x$  – расстояние от предприятия.

Для прологарифмированной модели  $p = 0.088$  ( $p$ -value по критерию Фишера), коэффициент де-

терминации  $R^2 = 0.91$ . График модели (1) приведен на рис. 2.

Эмпирическая модель (2) содержания фтора для смываемых листьев:

$$y_4 = \exp(4.1 - 0.27x + 0.005x^2), \quad (4)$$

где  $x$  – расстояние от предприятия.

Для прологарифмированной модели  $p = 0.079$  ( $p$ -value по критерию Фишера), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.92$ . График модели (4) приведен на рис. 3.

Взаимосвязь содержания фтора в смываемых и не смываемых листьях (направление северо-восток). Установлена очень сильная корреляционная связь между содержанием фтора в не смываемых ( $y_1$ ) и смываемых ( $y_2$ ) листьях, коэффициент корреляции равен  $\rho(y_1, y_2) = 0.999$ .

Парная линейная регрессия содержания фтора в не смываемых листьях ( $y_1$ ) на содержание фтора в смываемых листьях ( $y_2$ ) имеет вид:

$$y_1 = -2.2 + 4.2y_2, \quad (5)$$

где  $y_1$  – содержание фтора в не смываемых листьях,  $y_2$  – содержание фтора в смываемых листьях.

$b_2 = 4.2$  – коэффициент пересчета, показывающий на какое количество весовых единиц в среднем увеличивается содержание фтора в не смываемых листьях при увеличении содержания фтора в смываемых листьях на одну весовую единицу (для направления северо-восток).

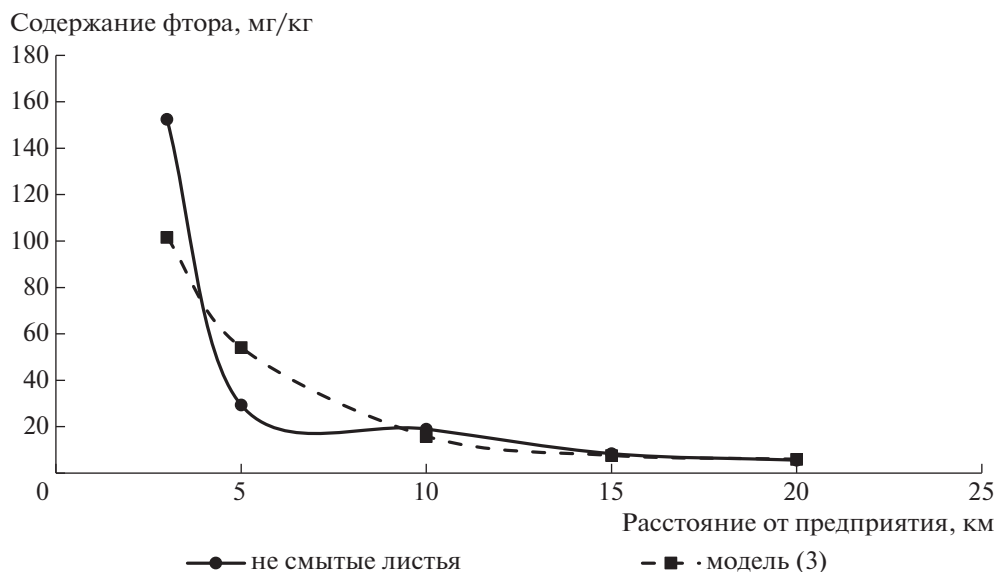


Рис. 2. Содержание фтора в не смытых листьях в зависимости от расстояния от предприятия (направление север).

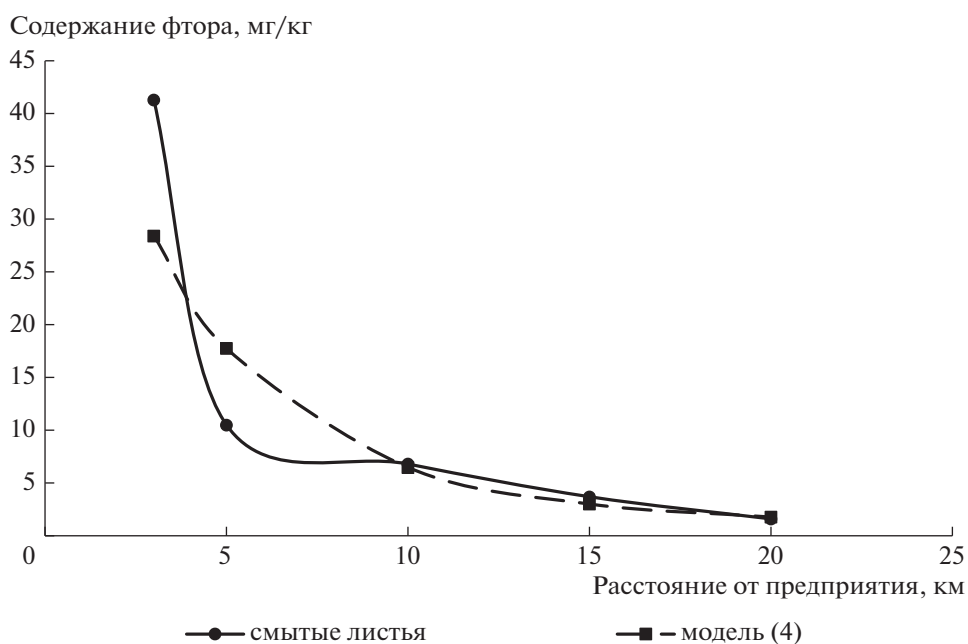


Рис. 3. Содержание фтора в смытых листьях в зависимости от расстояния до предприятия (направление север).

Эмпирическая модель (5) статистически значима на очень высоком уровне значимости 0.001% ( $F = 4291$  при критической величине  $F(0.99999, 1, 7) = 125.77$ ) коэффициент детерминации  $R^2 = 0.998$ . График зависимости (3) изображен на рис. 3.

Уравнение (5) позволяет с высокой степенью точности пересчитывать содержание фтора в смытых листьях в содержание фтора в не смытых листьях. График модели (5) представлен на рис. 4.

*Взаимосвязь содержания фтора в смытых и не смытых листьях (направление север).* Построим линейную эмпирическую модель (6), в которой содержание фтора в не смытых листьях ( $y$ ) оценена через содержание фтора в смытых листьях ( $x$ ):

$$y_6 = -5.52 + 3.8x, \quad (6)$$

где  $y_6$  – содержание фтора в не смытых листьях,  $x$  – содержание фтора в смытых листьях,  $b_1 = 3.8$  –

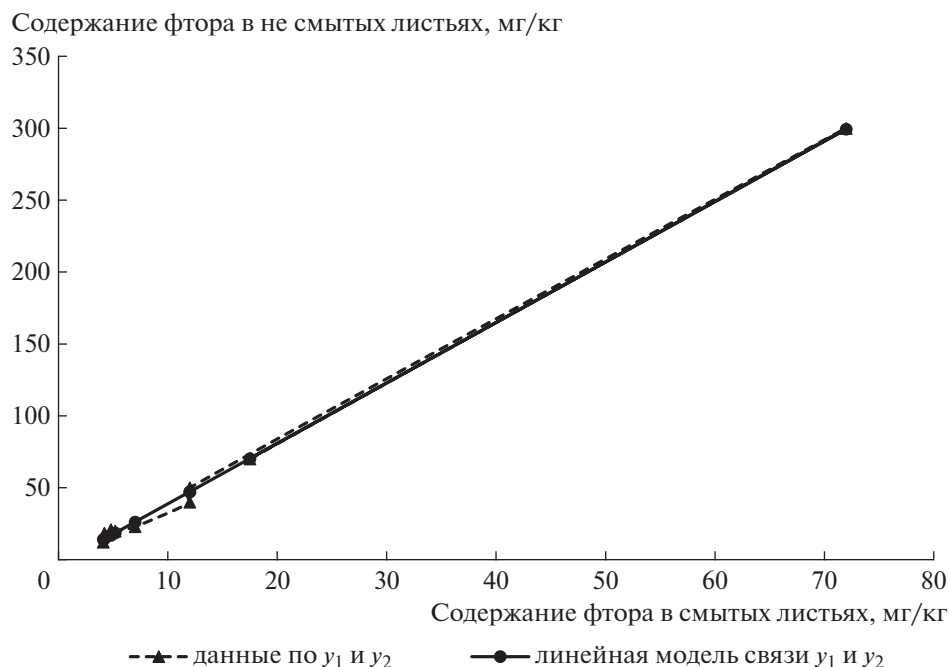


Рис. 4. Зависимость концентрации фтора в смываемых листьях хлопчатника от его содержания в не смываемых листьях (направление северо-восток).

коэффициент пересчета, показывающий на какое количество весовых единиц в среднем увеличивается содержание фтора в не смываемых листьях при увеличении содержания фтора в смываемых листьях на одну весовую единицу (для направления север).

Эмпирическая модель (6) статистически значима на очень высоком уровне значимости,  $p = 5.3 \times 10^{-10}$  практически равна нулю ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (6)), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.997$ . График модели (6) представлен на рис. 5.

Эмпирические модели (5) и (6) статистически значимы на очень высоком уровне значимости и очень точно описывают взаимосвязь содержания фтора в не смываемых листьях и содержанием фтора в смываемых листьях.

Проведенное исследование показало, что отложения аэральные выпадений не являются “пассивным”. Существует связь между содержанием фтора на листьях в составе техногенного наноса и его концентрацией в тканях листа. Таким образом, какое-то количество загрязняющих веществ способно переходить в мезофилл листа из техногенного наноса. По мнению [23], на поверхности листовых пластинок происходят многие биохимические процессы, реакции между элементами аэральные выпадений и поступающих

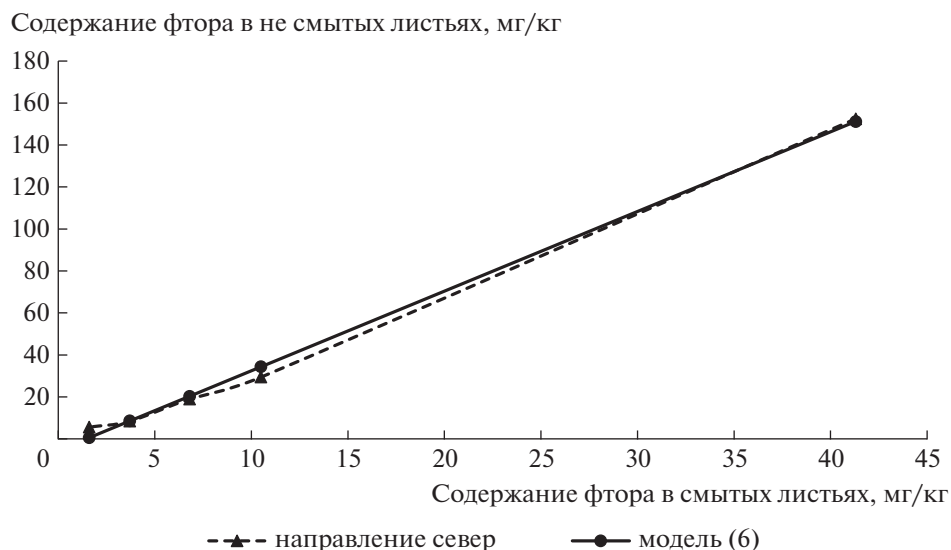
из живых тканей органических и минеральных соединений, которые способствуют растворению техногенных загрязнителей, делая их доступными для проникновения в растения. Например, в наших экспериментах цвет смывов с листьев имел зеленовато-желтую окраску. Выборочное изучение проб листьев хлопчатника показало, что содержание белка, определяемого по сумме аминокислот в смываемых листьях, было на 13% меньше, чем в не смываемых.

Различия в коэффициентах  $b_1 = 3.8$  и  $b_2 = 4.2$  являются статистически значимыми. Таким образом, переход фтора в ткань листа тем больше, чем выше загрязнение листовой поверхности. Чтобы убедиться в статистической значимости различий, применили методику ковариационного анализа [24]. Вводя дамми-переменные, можно построить общую линейную модель для 2-х направлений вместе:

$$y = a_1 d_1 + b_1 z_1 + a_2 d_2 + b_2 z_2, \quad (7)$$

где дамми-переменная  $d_1$  может иметь только 2 величины: 1 (для модели (5)) и 0 (для модели (6)), дамми-переменная  $d_2$  также может иметь только 2 величины: 1 (для модели (6)) и 0 (для модели (5)), т.е.  $d_2 = 1 - d_1$ ,  $z_1 = d_1 x_1$ ,  $z_2 = d_2 x_2$ , коэффициенты  $a_1 = -5.52$  и  $a_2 = -2.2$ .

Для модели (7) можно проверить гипотезу  $H_0 : b_1 = b_2$ , используя  $F$ -критерий и  $F$ -статистику



**Рис. 5.** Зависимость концентрации фтора в смываемых листьях хлопчатника от его содержания в не смываемых листьях (направление север).

[24]. Вычисления по методике ковариационного анализа [24] показали, что на высоком уровне значимости  $p = 0.013$  ( $p$ -value по критерию Фишера) гипотеза  $H_0 : b_1 = b_2$  отклоняется и, следовательно, различия в коэффициентах  $b_1 = 3.8$  и  $b_2 = 4.2$  являются статистически значимыми на очень высоком уровне значимости. Следовательно, вид изученной эмпирической зависимости существенно зависит от направления, поскольку для направлений север и северо-восток имеются статистически значимые различия.

*Связь между содержанием золы и содержанием фтора в смываемых листьях (направление северо-восток).* Построим линейную эмпирическую модель (8), в которой исследована связь между содержанием фтора в смываемых листьях ( $y_8$ ) и содержанием золы в смываемых листьях ( $x_2$ ):

$$y_8 = 293.27 - 13.89x_2, \quad (8)$$

где  $y_8$  — содержание фтора в смываемых листьях,  $x_2$  — содержание золы в смываемых листьях.

Эмпирическая модель (8) статистически значима на высоком уровне значимости,  $p = 0.04$  ( $p$ -value по критерию Фишера для эмпирической модели (8)), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.68$ . График модели (8) представлен на рис. 6.

Таким образом, имеется статистически значимая зависимость на высоком уровне значимости (5%) между содержанием золы и содержанием фтора в смываемых листьях. При этом зольность растений возрастала по мере увеличения содержания фтора в листьях.

Увеличение зольности растений по мере приближения к предприятию можно объяснить экологической пластичностью хлопчатника и его способностью усиливать приток необходимых элементов к пораженным тканям, позволяющим увеличивать концентрацию в листьях необходимых метаболитов в ответ на неблагоприятные условия произрастания (регуляторная функция поглощения). Это делает возможным возделывание этой культуры в непосредственной близости от предприятий туковой промышленности [14].

Таким образом, листовая поверхность хлопчатника в период вегетации (с мая по октябрь) в значительной степени “экранирует” почвенную поверхность и выступает в условиях засушливого климата как своеобразный “накопитель” продуктов техногенеза. Это позволяет использовать растения хлопчатника для индикации площади техногенного рассеяния выбросов предприятия по производству фосфорных удобрений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе данных исследования листьев хлопчатника, возделываемого в зоне выбросов предприятия по производству аммофоса, установлена возможность использования этой культуры для индикации площади аэротехногенного загрязнения фтором.

Выявлена взаимосвязь содержания фтора, расположенного на поверхности листьев в составе техногенной пыли, и его концентрацией в тканях. Показано, что большая часть фтора легко удаля-

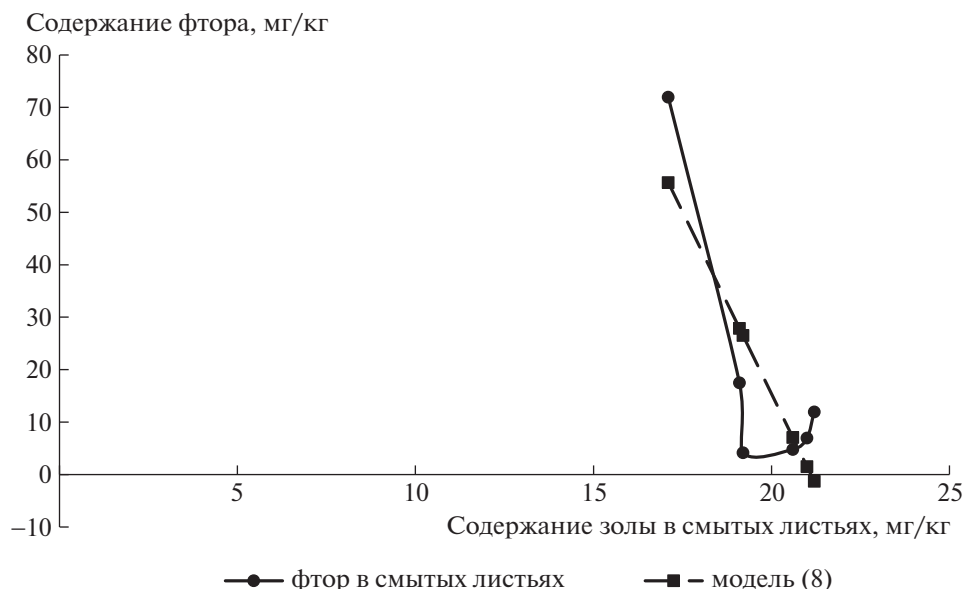


Рис. 6. Зависимость концентрации фтора от содержания золы в смывных листьях хлопчатника (направление северо-восток).

лась после смыва листовой поверхности дистиллированной водой. Разработаны эмпирические зависимости содержания фтора в смывных и не смывных листьях хлопчатника. Установлено, что вид изученной эмпирической зависимости зависит от направления распространения ветра. Выявлена связь концентрации фтора в смывных листьях хлопчатника и их зольностью при удалении от труб предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенных загрязнениях // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 65–71.
2. Куликов Б.П., Сторожев Ю.И. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров самообжигающимися анодами. Красноярск, 2012. 268 с.
3. Костышин С.С., Перепелица О.О., Сметанюк О.И. Особенности накопления фторидов в растениях луговых биотопов Северной Буковины // *Сибир. экол. журн.* 2011. № 6. С. 843–849.
4. Халитов А.Х., Родин И.А. О необходимости исключения фтора из состава минеральных удобрений // *Интенсификация сельскохозяйственного производства и проблемы защиты окружающей среды*. М.: Наука, 1980. С. 91–98.
5. Литвинович А.В., Алексеев Ю.В. Фитотоксичность фтора и пути ее снижения в связи с использованием фосфогипса в качестве химического мелиоранта // *Сб. научн. тр. СЗНИИСХ*. Л., 1985. С. 46–48.
6. Окорков В.В., Абдарахманов М.П. Содержание фтора в почвах и растениях при применении средств химизации в степной зоне Казахстана // *Агрохимия*. 1994. № 4. С. 85–95.
7. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Миграция фтора в почвах различных природно-климатических областей // *Агрохимия*. 1999. № 6. С. 74–81.
8. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2001. № 2. С. 74–78.
9. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Фтор в системе почва–растения при применении в сельском хозяйстве средств химизации и загрязнении объектов природной среды техногенными выбросами // *Агрохимия*. 2002. № 2. С. 66–76.
10. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф., Герш Н.Б. Гумусное состояние и биологическая активность сероземно-оазисной почвы в зоне техногенного воздействия // *Агрохимия*. 2003. № 10. С. 41–48.
11. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Потери Са, Mg, K, Na, Fe и F из орошаемой лугово-сероземной почвы в результате миграции. Эмпирические модели процесса элювирования (по данным лабораторного опыта) // *Агрохимия*. 2020. № 1. С. 58–69. <https://doi.org/10.31857/S0002188120010056>
12. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Сальников Э. Влияние разных способов внесения мелиорантов в сероземно-оазисную почву (Irragic Anthrosols) на интенсивность миграции фтора (по данным лабораторного опыта). Эмпирические модели процесса элювирования // *Агрохимия*. 2020. № 4. С. 47–56. <https://doi.org/10.31857/S0002188120040079>
13. Литвинович А.В., Осипов А.И., Павлова О.Ю. Влияние техногенного загрязнения на химический состав растений хлопчатника // *Агрохимия*. 1998. № 1. С. 71–77.



14. Литвинович А.В. Деградация хорошо окультуренных почв гумидных и аридных регионов. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2011. 288 с.
15. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и распределение свинца в почвах в зоне деятельности завода туковой промышленности // *Агрохимия*. 1996. № 3. С. 92–100.
16. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Осипов А.И. Содержание и запасы серы в техногенно загрязненных почвах // *Агрохимия*. 1998. № 12. С. 64–70.
17. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и особенности распределения валовых и кислоторастворимых форм соединений тяжелых металлов в профиле сероземно-оазисных почв в зоне химического завода // *Агрохимия*. 1999. № 8. С. 68–78.
18. Энциклопедия хлопководства. Ташкент, 1985. Т. 1. 561 с.
19. Хлопчатник. Климат и почвы хлопковых районов Средней Азии. Т. 2. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1957. 628 с.
20. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. Классификация и диагностика почв СССР. М., 1977. 255 с.
21. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: РАСХН, АФИ, СПбГУ, 2007. 141 с.
22. Загрязнение воздуха и жизнь растений. Женева: ВОЗ, 1962. 536 с.
23. Елпатьевский П.В., Аржанова В.С., Власов А.В. Взаимодействие растительности с потоком металлоносных аэрозолей. Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. С. 298–304.
24. Носко В.П. Эконометрика. М.: Издат. дом “Дело”, Сер. “Академический учебник”. 2011. 672 с.

## Modeling of the Process of Air Transport of Fluorine in the Composition of Aerial Emissions. The Use of Cotton Plants for the Indication of Industrial Pollution

A. V. Litvinovich<sup>a, #</sup>, O. Y. Pavlova<sup>a</sup>, A. V. Lavrishchev<sup>b</sup>, and V. M. Bure<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> *Agrophysical Research Institute  
Grazhdansky prosp. 14, Sankt-Petersburg 195220, Russia*

<sup>b</sup> *Sankt-Petersburg State Agrarian University  
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg—Pushkin 196601, Russia*

<sup>c</sup> *Sankt-Petersburg State University  
Universitetskaya nab. 6–9, Saint-Petersburg 199034, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru*

The study of the leaves of cotton plants cultivated in the emission distribution zone of the ammophos production enterprise allowed us to establish the possibility of using plants to indicate the area of aerotechnogenic fluorine pollution. It was found that most of the fluorine is easily removed from the leaf surface after washing with distilled water. The correlation between the content of fluorine accumulated in the composition of technogenic dust on leaves and its concentration in tissues was revealed. Empirical dependences of the fluorine content in washed and not washed cotton leaves have been developed. It is shown that the type of the studied empirical dependence depends on the direction of wind propagation. The relationship between the amount of fluorine in washed cotton leaves and their ash content when removed from the source of contamination is established.

*Key words:* process modeling, air transport, fluorine, aerial emissions, cotton, industrial pollution indication.