

УДК 546.16:631.41:632.122.2

ФТОР: МИГРАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ В ПОЧВАХ ПРИ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЯХ

© 2019 г. А. С. Фрид^{1,*}, Т. И. Борисочкина¹¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2018 г.

После доработки 28.09.2018 г.

Принята к публикации 10.12.2018 г.

Проанализированы имеющиеся в литературе данные по миграции фтора вглубь почв при многолетних аэрогенных загрязнениях в окрестностях криолитового и алюминиевого заводов (РФ). Проанализирован также модельный лабораторный эксперимент по миграции внесенного фторида при промывании почвенной колонки водой. Для анализа экспериментальных данных использовали диффузионную и конвективно-диффузионную модели. Оценки “кажущихся” коэффициентов диффузии и конвективной диффузии в полевых условиях составили диапазон от $n \times 10^{-9}$ до $n \times 10^{-7}$ см²/с. Конвективный перенос фтора в этих условиях был или недостоверен или направлен вниз. В лабораторном опыте коэффициент конвективной диффузии в супесчаной слабощелочной почве увеличивался до 1.4×10^{-5} см²/с.

Ключевые слова: фтор, миграционная подвижность в почвах, техногенные загрязнения.

DOI: 10.1134/S0002188119030062

ВВЕДЕНИЕ

Фтор участвует в биогеохимическом круговороте. Этот элемент имеет важное биологическое значение для растений, животных, человека: с одной стороны, он жизненно необходим в определенных количествах, с другой — является причиной различных заболеваний при больших содержаниях в среде, что часто происходит в техногенезе. Фтор относится к элементам первого класса опасности, стоит на 2-м месте после ртути по деструктивному действию на живое вещество [1, 2].

Основными промышленными источниками выбросов фтора в окружающую среду являются энергетические установки, металлургия, предприятия по производству алюминия (на 1 т алюминия нужно 33–47 кг фтора) и фосфорных удобрений, а также криолитовые, кирпичные, стекольные предприятия, различные отходы горно-геологических предприятий по добыче и обогащению флюорита, апатита, ряда редких металлов. До 96% всех выбросов фтора составляет фтористый водород [1].

В различных химических процессах фтор принимают в качестве окислителя. Также его используют в рефрижераторных установках, репеллентах, как добавку в воду и зубные пасты. В гипергенной

зоне криолит в основном легко растворяется, и подвижный фтор сорбируется глинистыми минералами и фосфоритами [2].

Среднее содержание фтора в земной коре — 625 мг/кг. Среднее содержание фтора в почвах мира — 321, для большей части почв — 140–400 мг/кг. В подзолах среднесуглинистых содержание фтора равно 175–462, в камбисолях тяжело-суглинистых — 470–1360, в карбонатных почвах 470–680, в органических почвах — <0.1–350 мг/кг [2].

Поведение фтора в почвах определяется несколькими характеристиками, главным образом содержанием глины, величиной pH, концентрациями кальция и фосфора. Почва может аккумулировать значительное количество фтора, особенно в горизонте В, который обогащен аморфными оксидами/гидроксидами алюминия. В природных условиях фтор малоподвижен, однако в кислых почвах его растворимость повышается из-за образования NaF, KF, NH₄F, тогда как фториды алюминия, кальция и магния малорастворимы. Растворимость фтора повышается при pH <5.0 и >6.0. В почвенном растворе фтор находится в виде комплексов AlF²⁺, AlF⁺, а также F⁻ и AlF₄⁻. Мо-

Таблица 1. Концентрация фтора в промывных водах, используемых для орошения луговой супесчаной почвы, при разовом внесении фтора на поверхность почвы и характеристики почвы [3, опыт 3]

Этап промывания (время, сут)	Концентрация, мг F/л	Характеристики почвы
1 (0–15)	39.7 ± 5.8	Физическая глина –
2 (15–30)	69.1 ± 6.0	15.7%
3 (30–45)	79.3 ± 4.9	pH _{H₂O} – 8.1
4 (45–60)	75.6 ± 7.4	Гумус – 0.8%
5 (60–75)	70.6 ± 9.1	Валовое содержание, %
6 (75–90)	41.6 ± 3.8	CaO – 9.5
7 (90–105)	22.3 ± 1.8	MgO – 2.5
8 (105–120)	15.8 ± 1.1	Na ₂ O – 1.8

гут присутствовать и другие ионные пары – AlF_6^{3-} , SiF_6^{2-} , BF_4^- . В карбонатных почвах фториды слабо растворимы, а комплексы фтора с железом, алюминием и кремнием определяют низкую миграцию фтора. В содовых почвах высокий уровень обменного натрия увеличивает растворимость фтора. Известно, что фтор охотно замещает гидроксилы в глинах, глинистых минералах, иллитах [2].

Загрязнение поверхности почв от различных источников может достигать нескольких тысяч мг F/кг. Эмиссия фтора из промышленных источников приносит на поверхность почвы растворимые фториды, которые движутся вниз по профилю, экстрагируя те элементы, которые образуют растворимые и стабильные комплексы. Главная часть попадающего в почву фтора эффективно фиксируется или легко удаляется из почв (песчаных, легких) водой. Кислые почвы сильнее сорбируют фтор, чем щелочные. Главная опасность загрязнения почв фтором – изменение свойств самих почв: в результате высокой химической активности фтора происходит деструкция гумусо-минеральных комплексов, что ведет к потере органического вещества и уменьшению активности почвенных энзимов [2].

Примеров применения математических моделей к описанию миграции фтора в почвах в литературе не найдено. Цель работы – оценить параметры моделей вертикальной миграции фтора в почвах при загрязнении по имеющимся в литературе экспериментальным данным и сопоставить их со свойствами почв.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве экспериментальных данных использовали те немногочисленные работы, в которых приведены распределения содержания фтора (при поверхностном загрязнении) по глубине почвы или выходные кривые при промывках загрязненной фтором почвы.

В лабораторном опыте с промывкой почвенной колонки с орошаемой незагрязненной луговой супесчаной почвой из пахотного слоя (Западная Фергана, Узбекистан) дистиллированной водой для имитации загрязнения вносили на поверхность почвы NaF [3]. Определяли концентрацию фтора в вытекающем растворе с помощью фтор-селективного электрода, получая так называемую выходную кривую. Высота почвы в колонке – 17 см, общая продолжительность промывания – 120 сут. Экспериментальные данные представлены в табл. 1. Для математического анализа выходной кривой использовали модель конвективной диффузии для полубесконечной среды с мгновенным источником на поверхности. Алгоритм вычисления параметров модели взят из работы [4].

Две экспериментальные работы сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева посвящены изучению вертикального распределения фтора в естественных почвах загрязненных территорий Оренбургской обл. в районе г. Кувандык (1980-е гг.), где с 1954 г. работает Южно-Уральский криолитовый завод [5, 6]. Район относится к 4-му округу Степной зоны Природно-сельскохозяйственного районирования СССР, Казахстанской провинции, засушливому, среднеобеспеченному теплом (сумма активных температур 2250°, коэффициент атмосферного увлажнения (отношение годовых осадков к испаряемости) равен 0.47). Рельеф возвышенно-волнисто-увалистый, абсолютные высоты – 200–300 м. Почвы тяжелосуглинистые, преимущественно южно-черноземные среднеспособные и маломощные и солонцово-черноземные [7]; на склонах и вершинах останцов отмечены выходы плотных коренных пород, что определяет развитие щебнистых маломощных черноземов [8].

Валовое содержание фтора в образцах почв определяли спектрально-эмиссионным методом с просыпкой пробы в стабилизированную дугу переменного тока с пределом обнаружения 50 мг/кг. Водорастворимый фтор в образцах почв определяли потенциометрическим методом с помощью фтор-селективного электрода и буфера Tisab (pH 6.5). На контрольной (фоновой) площадке в верхнем горизонте почвы установлено

Таблица 2. Содержание фтора в почвах окрестностей Южно-Уральского криолитового завода, мг/кг

1-я серия проб [5]		2-я серия проб [6]		
Глубина, см	F _{вал}	Глубина, см	F _{вал}	F _{водораст}
2 км на С-3 от завода, верхняя треть склона сопки		0.5 км от завода, межсочная равнина, злаково-разнотравная ассоциация, подстилка 0–3 см, горизонт А тяжелосуглинистый 3–20 (22) см (площадка 1)		
0–1	1400	0–3	1800	–
1–5	560	3–10	820	46
5–10	300	10–25	520	20
10–20	300	25–40	540	2.1
		40–50	540	1.1
Суммарно сверх фона	2140		6690	
3 км восточнее завода, целина (лесополоса) у подножья сопки		1.5 км на С-3 от завода, нижняя треть склона пологой сопки, полынно-типчакково-ковыльное сообщество, горизонт А задернованный (0–12 (14) см) с включениями щебня до 1–2 см, ниже 32 см горизонт ВС – сильнощебнистый тяжелый суглинок слабовскипающий (площадка 2)		
0–1	1820	0–2	1400	–
1–5	830	2–13	1300	27
5–10	510	13–25	540	15
10–20	380	25–38	410	0
		38–50	–	
		50–80	–	
Суммарно сверх фона	>4890		>15200	
		7 км на С-3 от завода, полынно-типчакково-разнотравная ассоциация, горизонт А суглинистый с включениями щебня (0–15 (18) см), ниже 35 (37) см горизонт ВС – сильнощебнистый суглинок (площадка 3)		
		0–3	390	3
		3–18	540	3
		18–28	390	0
		28–35	290	0
ПДК	–		–	10

Примечание. На контрольной (фоновой) площадке в верхних горизонтах почвы валовое содержание F – 290 мг/кг, водорастворимого F – 1.1 мг/кг [6].

валовое содержание фтора 290 мг/кг, что соответствовало среднему содержанию в почвах мира, водорастворимого – 1.1 мг/кг; на загрязненных изученных участках валовое содержание фтора в верхних слоях почвы доходило до 1820 мг/кг, водорастворимого – до 46 мг/кг, что значительно превышало ПДК.

О почвах первой серии отбора проб можно судить только по общей характеристике района и по указанным в табл. 2 элементам рельефа; для второй серии отбора проб известно наличие разнотравных ассоциаций и суглинистый характер гор. А с включениями щебня, что соответствует

вышеприведенной характеристике района [5, 6]. Сроки миграции приняты в 32 и 30 лет для 2-х серий отбора соответственно. Имеющаяся в публикациях информация представлена в табл. 2.

Для математического анализа в этих случаях и далее использовали модель диффузии с постоянным потоком вещества через поверхность почвы и модель конвективной диффузии с массообменом на поверхности почвы. Предполагали, что параметры моделей миграции постоянные по глубине почвы и времени миграции как результат многолетнего усреднения реальных изменений почвенных условий и скоростей почвенных про-

Таблица 3. Химический состав дерново-подзолистой почвы в окрестностях алюминиевого завода [9]

Горизонт, глубина (см)	Гумус, %	Валовое содержание макроэлементов, % на высушенную при 105°C навеску								Валовое содержание микроэлементов, мг/кг на прокаленную навеску									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Mn	Sr	Rb	Cr	Zn	Cu	Pb	Ni	As	F
Ао под- стилка	29.3	51.6	9.4	2.54	0.65	3.23	1.30	1.57	0.33	881	213	100	82.8	61.9	39.1	70.1	32.7	69.7	–
А ₁ А ₂ , 0–5	15.1	66.7	10.1	2.76	0.70	1.60	0.93	2.04	0.51	814	180	120	130	30.1	34.5	39.2	23.1	39.7	2650
А ₂ , 6–18	0.91	79.6	10.9	2.66	0.76	1.00	1.07	2.20	0.28	793	185	105	126	35.6	26.2	32.4	24.2	17.4	930
АВ, 18–34	0.58	75.4	12.6	4.28	0.81	1.05	1.51	2.36	0.78	822	177	103	160	34.1	25.1	13.5	26.9	23.2	680
В, 34–95	0.33	71.6	14.4	5.32	0.82	1.29	1.99	2.71	0.91	830	173	103	60.5	56.4	30.4	11.6	55.9	27.9	520
ВС, 95–110	0.30	74.4	12.8	4.60	0.69	1.65	1.67	2.28	1.03	822	214	92	116	47.0	60.8	26.7	38.5	28.6	380
ПДК (ОДК)										1500				(110)	(66)	(65)	(40)	(5.0)	

Таблица 4. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой почвы в окрестностях алюминиевого завода [9]

Горизонт, глубина (см)	рН _{KCl}	Кислотность		Обменные		V, %	Подвижные	
		обменная	гидроли- тическая	Ca	Mg		P ₂ O ₅	K ₂ O
Ао (подстилка)	5.24	7.4	18.2	–	–	–	11.5	36.1
А ₁ А ₂ , 0–5	4.25	5.8	12.6	3.8	0.9	27	6.3	8.6
А ₂ , 6–18	3.93	2.7	5.8	3.0	1.2	42	5.0	7.7
АВ, 18–34	3.82	2.2	4.5	3.9	1.3	54	3.7	7.5
В, 34–95	4.14	0.6	1.5	9.4	4.8	90	27.7	10.8
ВС, 95–110	4.52	0.4	1.1	8.5	3.9	92	67.4	8.2

цессов. Найденные таким образом параметры называют “кажушимися”. Фоновое содержание фтора оценивали как один из параметров модели.

Если авторы экспериментальных работ ошибки измерений содержаний не указывали, то для адекватного подбора параметров моделей миграции брали разброс $\pm 10\%$ от измеренной величины. Модель миграции и ее параметры считали адекватными, если расчетный профиль содержания фтора укладывался в коридор ошибок, и было соответствие между измеренными запасами фтора в почве сверх фона и рассчитанными по моделям.

Еще одна экспериментальная работа была проведена в окрестностях Волховского алюминиевого завода (Ленинградская обл.), начавшего промышленное производство алюминия в 1932 г. (в 1970–1972 гг. технологию улучшили, и заводские трубы подняли до 120 м); отбор почвенных образцов провели через 49 лет в 2.5 км северо-восточнее завода [9]. Почва – дерново-подзолистая суглинистая, ее химические и агрохимические свойства, а также валовое содержание фтора представлены в табл. 3, 4.

Для математического анализа профильного распределения фтора в этом случае использовали

Таблица 5. Параметры моделей миграции фтора в почвах

Место измерения	Диффузионная модель		Конвективно-диффузионная модель			
	D , см ² /с	фон, мг/кг	D_k , см ² /с	V , см/с	$C_{вх}$, мг/кг	фон, мг/кг
Предельно разбавленный водный раствор (25°C)	1.5×10^{-5}	0	—	—	—	—
Промывка лабораторной почвенной колонки с луговой супесчаной почвой дистиллированной водой	—	—	1.4×10^{-5}	3.4×10^{-6}	—	—
Почвы Оренбуржья						
2 км С-3 от завода	$(0.3-0.6) \times 10^{-8}$	270-330	$(0.15-0.28) \times 10^{-8}$	$(0.01-0.3) \times 10^{-9}$	1300-1700	270-330
3 км В от завода	$(1.5-1.6) \times 10^{-8}$	290-350	$(0.7-0.85) \times 10^{-8}$	$(-0.5...+0.01) \times 10^{-9}$	1680-1750	320-360
Почвы Оренбуржья						
0.5 км от завода	$(1.5-3.7) \times 10^{-8}$	468-540	$(0.8-1.4) \times 10^{-8}$	$(-0.33...+0.8) \times 10^{-9}$	1800-2200	450-600
1.5 км С-В от завода	$(15-25) \times 10^{-8}$	300-400	$(8-13) \times 10^{-8}$	$(-2...+1) \times 10^{-9}$	1400-1700	290-450
Ленинградская обл., Волховский алюминиевый завод, 2.5 км С-В завода, дерново-подзолистая суглинистая почва	—	—	А) $(6-12) \times 10^{-8}$ Б) $(2-5) \times 10^{-8}$	$(-8...-6) \times 10^{-9}$ $(0.5-1.1) \times 10^{-9}$	1600-1700 2200-2800	450-500 400-600

Примечание. D и D_k – “кажушиеся” коэффициенты диффузии и конвективной диффузии фтора; V – скорость направленного переноса фтора под действием потоков влаги и других возможных механизмов; $C_{вх}$ – условная концентрация фтора во входном потоке на поверхности почвы при массообмене; фон – средняя концентрация фтора в профиле почвы до загрязнения, оценена как параметр модели.

диффузионную модель со скачком содержания на поверхности минеральной части почвы через 39 лет после начала работы завода и конвективно-диффузионную модель с массообменом на той же поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Адекватные модели и соответствующие параметры получили для большинства собранных экспериментальных данных (табл. 5). Не удалось найти адекватного решения для 7-километрового удаления от завода в Оренбургской обл. и для диффузионной модели со скачком содержания на поверхности около Волховского алюминиевого завода.

Так как литературных данных параметров моделей миграции фтора в почвах не найдено, то полученные нами величины можно сопоставлять только со справочными данными диффузии в водном растворе и с величинами для других элементов. Оценка коэффициента диффузии фтора (D) для предельно разбавленного водного раствора получена нами путем пересчета из эквивалентной электропроводности.

В лабораторном колоночном опыте концентрация фтора в выходном растворе имела типичную временную динамику; использование для ее анализа алгоритма из работы [4] позволило учесть несимметричность полученной кривой. Высокие величины параметров D_k (коэффициент конвективной диффузии) и V (скорости направленного переноса вещества с какими-либо потоками) характерны для подобных опытов хроматографического типа с высокой скоростью промывки, при этом величина D_k (обусловленная не только собственно диффузией, но и перемешиванием потоком жидкости) достигала величин, характерных для чистого водного раствора. В то же время, подобный порядок величин D и D_k получен нами ранее для миграции Cd (и близко – для Со) в слабощелочных почвах Египта, длительно орошаемых городскими сточными водами [10]; характерно, что и в анализируемом колоночном опыте почва была слабощелочной (табл. 1).

В полевых условиях при длительном загрязнении фтором совершенно разных почв и в разных климатических условиях Оренбургской и Ленинградской обл. величины D и D_k были на 2–3 порядка меньше, чем в колоночном опыте, и имели

тот же порядок величин, что и многие другие элементы [10–12].

Для почв Оренбуржья была видна общая закономерность: в обеих сериях отбора, чем дальше от криолитового завода, тем больше были величины D и D_k . В то же время, осталось неясным, связано ли это с характером почв и рельефа или с качеством выпадающих на поверхность почв частиц на разных расстояниях от завода. Величины параметра V здесь в 3-х случаях из 4-х не отличались достоверно от нуля, а в одном случае (причем при наименьших величинах D_k) поток был направлен вниз. Рассчитанные средние фоновые содержания в почвах в 3-х случаях из 4-х были близки к измеренному фону вдали от завода, а в одном случае рассчитанный фон оказался несколько выше. Концентрации фтора во входном потоке на поверхности почвы ($C_{вх}$) оказались во всех случаях близки к его концентрациям в верхнем слое почвы, как и должно быть (табл. 2).

Для миграции фтора в дерново-подзолистой суглинистой почве в окрестности Волховского алюминиевого завода адекватной оказалась только конвективно-диффузионная модель с 2-мя качественно различающимися вариантами параметров: в варианте А поток фтора (V) был направлен вверх, а в варианте Б – вниз. Если сравнить величины $C_{вх}$ с содержанием фтора в верхнем слое и расчетное фоновое содержание с содержанием фтора в нижнем слое (табл. 3), то преимущество следует отдать варианту Б, что соответствует типовому представлению об элювиальном процессе в подобных почвах.

Данные табл. 3 и 4 показали явную дифференциацию дерново-подзолистой почвы по содержанию макро- и микроэлементов, обменных оснований, но резкий рост содержания подвижного фосфора в горизонтах В и ВС мог свидетельствовать не только об иллювиальном накоплении в них, но и о подстилании другой породой. Эта дифференциация никак не сказалась на содержании валового фтора в профиле почвы. Дополнительно нужно отметить, что почва была сильно загрязнена мышьяком по всему профилю, а содержания Ni и Cu в нижних горизонтах достигали и даже превышали ОДК, что, скорее всего, свидетельствовало не о техногенном загрязнении этими элементами, а об обогащенности ими и фосфором подстилающей породы.

ВЫВОДЫ

1. Имеются только единичные экспериментальные данные о вертикальной миграции в почвах фторидных загрязнений в полевых условиях.

По этим данным математические модели миграции – диффузионная и конвективно-диффузионная – вполне адекватно могут описывать наблюдаемые вертикальные распределения фтора.

2. Найдены величины “кажущихся” коэффициентов диффузии фтора в почвах при длительных аэрогенных загрязнениях – от 0.4×10^{-8} до 20×10^{-8} см²/с, коэффициентов конвективной диффузии – от 0.2×10^{-8} до 10×10^{-8} см²/с (в лабораторном опыте с промывкой почвенной колонки – 1.4×10^{-5} см²/с). Такой порядок величин близок тому, который известен для характеристики загрязнения тяжелыми металлами. Конвективный перенос фтора в почвах был или недостоверен, или направлен вниз.

3. Из-за малой выборки и недостаточной информации о свойствах почв сопоставление с ними параметров моделей миграции пока затруднено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Справочник. Кн. 2. Главные p -элементы. М.: Недра, 1994. 303 с.
2. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plant. Boca Raton–London–N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. 4th ed. 505 p.
3. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В.* Миграция фтора в почвах различных природно-климатических областей // *Агрохимия*. 1999. № 6. С. 74–81.
4. *Рыжинский М.В., Фрид А.С., Прохоров В.М.* Сравнение точного и приближенного решений уравнения вынужденной диффузии при определении параметров хроматографического переноса // *Жур. физ. химии*. 1971. Т. 45. № 11. С. 2875–2879.
5. *Важенин И.Г.* Деградация плодородия черноземных почв под воздействием техногенеза // *Агрохимия*. 1991. № 5. С. 85–95.
6. *Головкова Т.В., Сиволобова Т.С.* Фтор в почве окрестностей криолитового завода / Система методов изучения почвенного покрова, деградированного под влиянием химического загрязнения: научные труды. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1992. С. 86–89.
7. *Земельные ресурсы СССР. Ч. 1. Природно-сельскохозяйственное районирование территории областей, краев, АССР и республик.* М.: ГИЗР, 1990. 264 с.
8. *Особенности использования почв степной и сухостепной зон: метод. рекоменд. и справ. мат.-лы.* М.: ВАСХНИЛ, Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1989. 67 с.
9. *Важенин И.Г.* Влияние выбросов алюминиевого завода в атмосферу на химический состав и агрохимические свойства почвы / Научные основы охраны почв Ленинградской области // *Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева*. Вып. 38. 1986. С. 16–20.

10. Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И. Миграция тяжелых металлов в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами (подведение итогов) // *Агрохимия*. 2016. № 11. С. 46–57.
11. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции тяжелых металлов и других элементов из пиритных хвостов в первые два месяца после попадания на карбонатную песчаную почву // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 88–98. doi 10.7868/S0002188118020084
12. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции тяжелых металлов в ненарушенных лесных почвах в зоне воздействия сталелитейного завода // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 72–76. doi 10.7868/S0002188118030092

Fluorine: Migration Mobility in Technogenic Polluted Soils

A. S. Frid^{a,#} and T. I. Borisochkina^a

^a *V.V. Dokuchaev Soil Science Institute
Pyzhevsky p. 7, Moscow 119017, Russia*

[#] *E-mail: asfrid@mail.ru*

The data available in the literature on fluorine migration into the soil subject to long-term aerogenic pollution in the vicinity of the cryolite and aluminum plants (RF) were analyzed. A model laboratory experiment on the migration of applied fluoride in the soil column washed with water was also analyzed. The diffusion and convection-diffusion models were used for the analysis of experimental data. Estimates of “apparent” diffusion and convective diffusion coefficients under field conditions were in the range from $n \times 10^{-9}$ to $n \times 10^{-7}$ cm²/s. Convective transfer of fluorine in these conditions was either unreliable or directed downward. In a laboratory experiment the convective diffusion coefficient in a weakly alkaline sandy loam soil increased to 1.4×10^{-5} cm²/s.

Key words: fluorine, migration mobility in soils, technogenic pollution.