

ВЗАИМОСВЯЗЬ НАКОПЛЕНИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКЕ И ПОЧВАХ С ВИДОВЫМ СОСТАВОМ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ГРИБОВ

Одним из основных компонентов лесных биогеоценозов является почва, от изменения физических, химических и биологических свойств которой зависит ее плодородие и в конечном итоге устойчивость растений к промышленным поллютантам. Основное внимание при изучении биогеоценозов уделяется влиянию сернистого ангидрида, тяжелых металлов (Виноградов, 1962; Дубровина, 1984) и лишь в единичных исследованиях — воздействию фторсодержащих соединений (Гапанюк, 1982) на видовой состав микроскопических грибов лесной подстилки и почв. Механизмы миграции фторсодержащих соединений в лесной подстилке и почвах не исследовались.

Целью нашей работы являлось изучение механизма накопления фторсодержащих соединений в лесной подстилке и почвах сосновых насаждений и изменения видового состава микроскопических целлюлозоразрушающих грибов. Наблюдения проводились в течение двух лет в сосновых насаждениях искусственного происхождения (возраст 20—26 лет) на постоянных пробных площадях (ППП) на разном удалении от источника фторсодержащих выбросов — Полевского криолитового завода (ПКЗ; 1,0—1,5; 2,0—2,5; 4,0—4,5; 7,0—7,5; 14—15 км) по направлению преобладающих ветров (восточное и северо-восточное). В качестве контрольной ППП выбраны сосновые насаждения того же возраста на расстоянии 26—30 км в юго-восточном направлении от ПКЗ. На ППП типичные почвы данного района: серая лесная разной степени оподзоленности и бурая горно-лесная тяжело- и легко-суглинистая.

Изучение механизма накопления фторсодержащих соединений в лесной подстилке и почве на каждой ППП проведено по полно-профильным почвенным разрезам. Образцы лесной подстилки и верхнего горизонта почвы для анализа отбирались с трех фиксированных площадок 10×10 см, отстоящих друг от друга на 2—3 м, четыре раза за вегетационный период (май—октябрь).

Для накопления и выделения целлюлозоразрушающих грибов использовали кислую среду Частухина, видоизмененную Захаровым (рН=4,5—5,0). Культивирование проводили во влажной камере при комнатной температуре. Индекс встречаемости, или коэффициент заселения, определялся по формуле:

$$K_3 = \frac{M \cdot 100\%}{n},$$

где M — число проб субстрата, в которых обнаружен данный вид, n — общее число исследуемых проб.

Определение фтора в почвенных и растительных образцах осуществляли потенциометрически с использованием фторселективного электрода ЭФ = VI. Анализ общего фтора в почвах проводили с предварительным пирогидролитическим выделением из пробы фторсодержащих соединений (Хоземова, 1979). Анализ водорастворимого фтора в почвах осуществляли по методике Farrah (1985), модифицированной Т. В. Головковой в Институте почвоведения им. В. В. Докучаева. В растительных образцах и лесной подстилке фтор определяли по методике Л. А. Хоземовой (1983).

Летние периоды исследуемых годов характеризовались разными метеорологическими условиями: в 1986 г. лето было дождливым (количество осадков с мая по сентябрь около 440 мм), в 1988 г. — засушливым (количество осадков около 200 мм). Это отразилось на накоплении фтора в лесной подстилке и почвах и оказало существенное влияние на видовой состав микроскопических грибов.

В результате исследований выявлена зависимость накопления фторсодержащих соединений в лесной подстилке и почвах от расстояния до источника выбросов, которая представляет собой убывающую функцию (табл. 1). Так, наибольшее содержание фтора в почвах обнаружено на расстоянии 1,0—2,5 км, в горизонте АО''' (2—3 см) на ППП 1—13 800 мг/кг, на расстоянии 4,0—4,5; 7,0—7,5; 14—15 км соответственно 4110, 1650 и 130 мг/кг.

Таблица 1

Общее содержание фтора и его подвижных форм в лесной подстилке и почве под посадками сосны

Генетический горизонт	Глубина взятия образца, см	Содержание подвижного фтора, мг/кг	Общее содержание фтора, мг/кг
ППП 13, разрезы 41 и 42; 1—1,5 км от ПКЗ			
АО	0—2	1788,0	Не определено
A1	2—9	13,1	»
A1	10—20	11,3	»
A2B1	30—40	9,5	»
B1	40—50	9,0	»
B2	50—60	5,6	»
B2	70—80	5,2	»
BC	100—110	5,0	»
C	130—140	5,0	»
ППП 1, разрезы 24, 25, 26, 27, 28; 2,5 км от ПКЗ			
АО'	0—1	914,0	2460

Продолжение табл. 1

Генетический горизонт	Глубина взятия образца, см	Содержание подвижного фтора, мг/кг	Общее содержание фтора, мг/кг
АО''	1—2	1406,0	11850
АО'''	2—3	1766,0	13800
A1	3—8	15,4	1030
A1	10—20	9,6	600
A1	20—30	5,9	280
A1B1	35—45	2,8	Не определено
B2	70—80	3,5	330
B	110—120	3,4	310
C	140—150	2,7	Не определено
ППП 2, разрезы 6, 7, 8, 9, 10; 4—4,5 км от ПКЗ			
АО'	0—1	1059,0	2100
АО''	1—2	1758,0	4110
АО'''	2—3	1797,0	3000
A1	3—8	91,2	150
A1	8—13	85,6	370
A2	17—24	7,9	120
A2B1	23—30	8,4	230
B1	30—40	4,9	Не определено
B2	60—70	6,6	290
BC	90—100	4,3	250
C	110—140	0,9	Не определено
ППП 3, разрезы 11, 12, 13; 7—7,5 км от ПКЗ			
АО'	0—1	84,0	1900
АО''	1—3	119,5	1650
АО'''	3—4	162,5	3660
A1	4—10	12,1	370
A1A2	8—16	5,2	190
A2B1	16—20	6,3	Не определено
B1	25—34	4,8	310
B2	40—50	4,5	240
B2	60—70	5,5	Не определено
BC	80—90	4,2	120
C	100—120	4,2	120
Д	130—140	2,5	Не определено
ППП 4, разрезы 15, 16, 17, 18; 14—15 км от ПКЗ			
АО'	0—1	59,4	80
АО''	1—2	67,1	130
АО'''	2—3	69,1	210
A1	3—8	5,2	180
A1B1	8—10	7,1	Не определено
B1	10—20	4,8	130
B2	25—35	3,3	90
B2	40—50	4,5	Не определено
BC	68—78	3,2	140
C	76—85	4,2	140
ППП 6, разрезы 1, 2, 3, 4, 5; 26 км от ПКЗ			
АО'	0—1	41,2	Не определено
АО''	1—2	42,4	»
АО'''	2—3	41,5	»
A1	3—10	2,0	320
A1B	10—15	2,0	250
A1B	15—25	0,8	310

Окончание табл. 1

Генетический горизонт	Глубина взятия образца, см	Содержание подвижного фтора, мг/кг	Общее содержание фтора, мг/кг
B1	30—40	0,6	350
B2	50—60	0,8	260
B2	80—90	1,0	180
BC	90—110	0,9	110
C	115—140	1,9	170
CD	140—150	2,3	Не определено

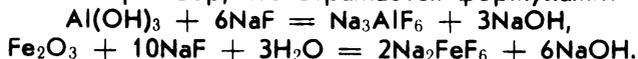
Присутствие фтор-иона в почве обнаружено на расстоянии 26 км от ПКЗ на контрольной пробной площади ППП 6, где его концентрация соответственно в горизонте А1, В и С достигает 320, 350 и 170 мг/кг. Такое повышенное содержание фтор-иона в почве на значительном удалении от источника выбросов можно объяснить тем, что фтор — один из самых распространенных элементов в литосфере и его содержание в незагрязненных почвах колеблется от 30 до 300 мг/кг (Виноградов, 1962). Фтор относится к числу легкоподвижных химических элементов, у которых коэффициент водной миграции достаточно велик — от 1 до 10 (Udrescu, 1987), что ведет к распределению его во всех горизонтах почвенного профиля.

Аккумуляция фтора довольно интенсивно идет во всех компонентах лесного биогеоценоза, но наиболее высокие показатели характерны для лесной подстилки, перегнойно-аккумулятивного горизонта почв (А1) и верхних, прилегающих к нему генетических горизонтов. Так, в горизонтах АО' (0—1 см), АО'' (1—2 см), АО''' (2—3 см) на ППП 1 содержание общего фтора на 1 кг почвы составляет соответственно 2460, 11 850 и 13 800 мг, на ППП 3 в тех же горизонтах содержится соответственно 1900, 1650 и 3660 мг/кг общего фтора. Вниз по профилю накопление фтора резко снижается и в горизонте А1 составляет 370, в горизонте В1 — 310 и в горизонте С — 120 мг/кг.

Фтор, попадая в почву, включается в процессы круговорота химических элементов, подвергаясь различным превращениям. Основными агентами поглощения фтор-иона в почвах являются силикаты и свободные оксиды алюминия и железа. Возможные механизмы поглощения: прямое замещение фтор-ионами гидроксил-ионов кремния, свободных гидроксидов и полимеров алюминия, адсорбированных на минералах; образование нерастворимых фторалюмосиликатов — $A1_2(SiF_6)_3$, нерастворимых или растворимых фторалюминатов и фторферратов. Возможно поглощение фтора глинистыми частицами (Дубровина, 1984):



а также комплексообразование, приводящее к возникновению труднорастворимых фторалюминатов и фторферратов и переходу гидроксидов в раствор, что отражается формулами:



Во всех приведенных вариантах взаимодействия фтор-ионов с минеральными компонентами почв образовавшийся гидроксид-ион должен несколько повышать pH почвенного раствора. Действительно, на всех пробных площадях в верхних горизонтах почв величина pH_{KCl} несколько повышена. Так, в горизонтах АО'' (1—2 см), АО''' (2—3 см), А1 (3—8 см) на пробной площади (ППП 1) pH_{KCl} соответственно равно 5,8; 5,9 и 4,6, а в горизонте С — 3,8. Положительная корреляция накопления фторсодержащих соединений в лесной подстилке и почвах с pH_{KCl} обнаружена и при изучении сезонной динамики.

Одной из причин, вызывающих увеличение pH, может служить анионнообменный характер адсорбции фтор- и гидроксид-ионов (Хоземова, 1989). Такой вид адсорбции возможен на положительно заряженных коллоидах, содержащих в потенциалоопределяющем слое обменные ОН-ионы. Наибольшая способность поглощать фтор-ионы у кислых почв, наименьшая — у щелочных. Именно поэтому исследуемые кислые лесные почвы под сосновыми насаждениями, имеющие $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5$, активно сорбируют фтор-ионы, снижая содержание водорастворимых форм фторидов. Так, на расстоянии 2,5 км от ПКЗ (ППП 1), несмотря на высокое общее содержание фтора, например, в горизонте А1 (3—8 см) 1030 мг/га, накопление водорастворимых его форм в 68 раз ниже и составляет 15,4 мг/кг. Это связано с тем, что, вступая в контакт с почвенными частицами, подвижные соединения фтора перераспределяются по компонентам почвы, трансформируясь в другие соединения. В целом трансформация фторидов в почве выражена в относительном уменьшении водорастворимых, мобильных соединений фтора.

Поступление фторсодержащих соединений в почву происходит не только с воздушными потоками, но и через растения. Ежегодное поступление в почву обогащенного фтором опада и отмирающих частей растений поддерживает высокую техногенную нагрузку на лесную подстилку и верхние органогенные горизонты почв. Как показали результаты исследований, присутствие фторсодержащих соединений обнаружено во мхах, злаках, разнотравье, коре сосны, отобранных на разном расстоянии от ПКЗ. Наибольшая концентрация фторсодержащих соединений в растительных тканях обнаружена на расстоянии 1—4 км от источника загрязнения и составляет в злаках 717, в разнотравье 801, в коре сосны 579 мг на 1 кг воздушно-сухого вещества, что в 20—30 раз больше, чем на контрольной площади. Многолетнее воздействие пол-

лютанта на растения вызвало повышенное содержание фтора в мхах (1074 мг/кг) и коре сосны.

Сравнивая содержание подвижных форм фтора в растительных тканях, лесной подстилке и в верхних органогенных горизонтах почв, можно отметить, что характер зависимости накопления фторидов в злаках, разнотравье и коре сосны, лесной подстилке (горизонт АО) и в гумусовом горизонте А1 от расстояния до источника загрязнения идентичен. Максимальное накопление фтора наблюдается на расстоянии 1—4 км от источника загрязнения.

Видовой состав микроскопических грибов, в том числе целлюлозоразрушающих, зависит от характера питательного субстрата лесной подстилки и верхних горизонтов почв, а также от конкурентоспособности каждого вида грибов. Как известно, лесная подстилка хвойных и смешанных лесов характеризуется высоким содержанием труднорастворимых веществ (клетчатки, лигнина, пектина). Все это исключает возможность развития целого ряда микроскопических грибов. Качественный состав целлюлозоразрушающих микроорганизмов лесной подстилки исследуемых ППП сосновых насаждений имеет ряд особенностей (табл. 2). В основном это представители родов *Penicillium* и *Trichoderma*. Микроскопические грибы этих родов встречаются в исследуемых образцах в течение всего вегетационного периода, как в процессе таяния снега при низких температурах, так и при наступлении жаркой и сухой погоды летом, когда обнаруживается дефицит влаги. Это, очевидно, связано с тем, что многие виды родов *Penicillium* и *Trichoderma* имеют наиболее активные целлюлозоразрушающие ферменты, оптимум действия которых лежит в кислотной области значения рН.

Таблица 2

Концентрация подвижного фтора, обменная кислотность и видовой состав микроскопических грибов в почвах Полевского криолитового завода

Время отбора	Горизонт почвы	рН солевой	Содержание фтора, мг/кг	Вид грибов**
		1,5 км*		
Май	АО'	6,1	820,0	1
	АО''	6,0	2054,0	1
	АО'''	4,4	130,0	1,2
	А1	4,4	8,2	1,2
Июль	АО'	5,7	1716,0	—
	АО''	5,0	430,0	2,3
	АО'''	4,7	130,0	2,3
	А1	4,6	95,6	1,2
Сентябрь	АО'	6,0	820,0	1,2
	АО''	5,8	651,0	1,2
	АО'''	5,8	410,0	1,2,6

Окончание табл. 2.

Время отбора	Горизонт почвы	pH солевой	Содержание фтора, мг/кг	Вид грибов**
4,0 км				
Май	АО'	5,6	192,7	1,3
	АО''	5,5	258,7	1,3
	АО'''	5,2	162,7	2,4
	A1	Лёд		
Июль	АО'	5,4	392,0	1
	АО''	5,3	461,0	1,3
	АО'''	4,8	234,4	1,3,5
	A1	4,9	58,1	3,9
Сентябрь	АО'	5,4	241,8	1,3
	АО''	5,4	215,0	1,3,4
	АО'''	5,2	120,3	1,4
	A1	4,4	41,1	4,5
7,0 км				
Май	АО'	5,5	81,9	1,4
	АО''	4,8	167,7	1,3,6,4,9
	АО'''	4,6	44,2	3,6,2,4
	A1	4,5	23,1	6,3,2
Июль	АО'	4,8	163,3	1,3
	АО''	4,8	291,2	1,3,7
	АО'''	4,3	209,4	1,3,7
	A1	4,2	49,2	7
Сентябрь	АО'	5,8	30,4	1,2,6
	АО''	5,7	78,4	1,2,6
	АО'''	5,0	73,1	1,4,6,5
	A1	4,7	3,8	1,4,5
15,0 км				
Май	АО'	5,6	17,2	1,8
	АО''	5,6	50,7	1,8
	АО'''	5,7	51,7	8
	A1	5,6	34,5	8
Сентябрь	АО'	4,9	4,1	1,8,3
	АО''	4,8	14,5	1,8
	АО'''	4,8	16,5	1
	A1	4,3	13,0	1
26,0 км				
Май	АО'	5,5	4,3	1,2
	АО''	5,7	26,0	1,2
	АО'''	5,7	28,3	2
	A1	5,0	11,3	2
Июль	АО'	5,4	5,8	2
	АО''	5,4	16,3	2,4
	АО'''	5,3	15,4	2,4
	A1	5,2	4,6	2,5
Сентябрь	АО'	6,5	11,6	1,7,3
	АО''	5,5	12,1	1,7
	АО'''	5,5	12,1	1,4,3
	A1	5,5	4,6	1,3

* Расстояние от Полевского криолитового завода.

** Вид грибов: 1 — *Trichoderma lignorum*, 2 — *Renicillium frequentans*, 3 — *Penicillium jenseni*, 4 — *Cladosporium hebratum*, 5 — Actinomycetes, 6 — *Penicillium funiculosum*, 7 — *Thryaonophra penicilloides*, 8 — *Penicillium camemberti*, 9 — *Rhizophycti roseu*.

При сравнительном изучении активности целлюлаз (Мирчинк, 1978) *Trichoderma vrides* рода *Rhizopus*, *Aspergillus niger* наиболее активной оказалась целлюлаза *Trichoderma lig.* Целлюлозоразрушающие ферменты *Trichoderma lignorum* равны: С₁-фермент — 0,59, а С₇-фермент — 0,9. Высокой целлюлозоразрушающей способностью обладают штаммы *Cladosporium hebrarum*.

Для характеристики своеобразия состава видов грибов в настоящее время используется понятие комплекса типичных видов. Комплекс типичных видов выделяется на основе пространственной и временной частоты встречаемости вида. Пространственная частота характеризуется отношением числа образцов, в которых обнаружен вид, к общему числу исследуемых образцов, а временная — отношением числа сроков в году, когда вид обнаружен, к общему числу сроков отбора образцов. Распределение видов в комплексе с учетом их встречаемости характеризует структуру комплекса. Известно, что техногенное воздействие оказывает существенное влияние на почву, вызывая изменения в комплексе микроскопических грибов (микромикетов). Сравнивая состав комплекса микромикетов в почве, не подверженной техногенному воздействию, с комплексом микромикетов почвы, находящейся под воздействием фторсодержащих выбросов ПКЗ, можно в какой-то степени выявить это влияние. Чем меньше коэффициент сходства, рассчитываемый по количеству видов и их встречаемости, тем значительнее степень отрицательного влияния.

Из литературных данных известно, что ведущую роль в разрушении целлюлозы растительных остатков подзолистых почв играют виды родов *Penicillium*, *Mycogone*, *Trichoderma*, *Dematium*, *Verticillium altennaria* (Ferrah, 1985). Результаты наших исследований (см. табл. 2) свидетельствуют, что в подстилке сосновых насаждений района ПКЗ присутствуют виды родов *Penicillium*, *Trichoderma*, *Cladosporium*. При высокой концентрации фтора в подстилке (130—2054 мг/кг) доминируют только виды рода *Penicillium*, *Trichoderma*. Наличие большого количества фтора в лесной подстилке тормозит развитие наиболее типичных целлюлозоразрушающих грибов, таких как грибы рода *Verticillium*, *Mycogone*, *Dematium*. Грибы *Penicillium frequentens*, *Trichoderma lignorum*, присутствующие в лесной подстилке и аккумулятивном слое почвы практически на всех исследуемых ППП в течение всего вегетационного периода, оказались наиболее устойчивыми к повышенным концентрациям фтор-иона. Так, в июле на ППП, удаленных от источника загрязнения на 1,5, 4,0 и 7,0 км, концентрация подвижного фтора в лесной подстилке значительно возросла, что в свою очередь сказалось на видовом составе микроскопических грибов верхних слоев подстилки. На участке, удаленном на 1,5 км от ПКЗ, в ферментативном слое (АО) при концентрации фтор-иона

1716 мг/кг не выявлены микроскопические грибы, а на расстоянии 4 км при концентрации фтора 461 мг/кг встречается только *Trichoderma lignorum*.

Концентрация подвижного фтора в лесной подстилке в течение всего вегетационного периода меняется, особенно на участках, близко расположенных к источнику загрязнения. Так, на участке, находящемся в 1,5 км от источника выбросов, в начале вегетационного периода в ферментативном слое отмечалась наибольшая концентрация фтора (2054 мг/кг), а уже в сентябре она существенно снизилась до 565 мг/кг, на участке, находящемся в 7,0 км, уменьшение происходило с 304 до 11 мг/кг и т. д. На участке, расположенном в 26 км от источника выбросов, концентрация фтора в ферментативном слое была невысока и изменение концентрации фтор-иона к осени в ферментативном и гумусированном подгоризонтах лесной подстилки на всех исследованиях ППП связано в определенной мере с погодными условиями, а именно с засушливым жарким летом (всего за июнь—август выпало около 120 мм осадков) и дождливой осенью (в сентябре выпало около 70 мм осадков). Обильное выпадение осадков в осенний период, по-видимому, привело к значительной миграции фтор-иона из верхних подгоризонтов лесной подстилки в нижние горизонты почвы.

Таким образом, накопление общего фтора и подвижных его форм в лесной подстилке и почвах зависит от расстояния до источника загрязнения и представляет собой убывающую зависимость. Перераспределение подвижных фторсодержащих соединений по компонентам почв ведет к трансформации их в другие соединения и выражено в относительном уменьшении мобильных, подвижных форм. В результате идентификации штаммов микромицетов в лесной подстилке и почве сосновых насаждений в зоне действия фторсодержащих выбросов установлено, что чем ближе расположен исследуемый участок к источнику загрязнения, тем беднее видовой состав целлюлозоразрушающих микроскопических грибов. Так, на участке, находящемся в 1,5 км от источника, в течение всего вегетационного периода встречаются целлюлозоразрушающие грибы, принадлежащие к родам *Penicillium*, *Trichoderma*, на расстоянии 4,0 и 7,0 км их число увеличивается, появляется кроме этих родов еще *Cladosporium*, *Rhizorhynchis*. Это свидетельствует о том, что повышенная концентрация подвижного фтора в лесной подстилке и почве оказывает существенное ингибирующее влияние на видовой состав микроскопических грибов.

Определение содержания фторсодержащих соединений и видовой состава микроскопических грибов в лесной подстилке и почвах даст возможность в дальнейшем использовать эти показатели для зонирования лесных территорий, подверженных воздействию атмосферных поллютантов.

ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почве. М.: Госкомиздат, 1962. 250 с.
- Галонюк Э. Н., Кремленкова А. П., Моршина Т. Н. Изменение свойств дерново-подзолистых почв и серозема под влиянием фтора // Почвоведение. 1982. № 4. С. 148—154.
- Дубровина И. В., Корнблум Э. А. Природа поглощения почвами фтора, удобренных и мелиорантов // Почвоведение. 1984. № 9. С. 23—24.
- Марфенина О. Е., Мирчинк Т. Г. Микроскопические грибы при антропогенном воздействии на почву // Почвоведение. 1988. № 9. С. 107—112.
- Методы изучения почвенных микроорганизмов и их метаболитов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 212 с.
- Мирчинк Т. Г. Почвенная микология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 212 с.
- Орлов Д. С. Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 375 с.
- Рябинин Н. А., Танин Г. Н., Кирченко О. А. О некоторых особенностях устойчивости почвенной биоты к загрязнению сернистым ангидридом // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. Пушино, 1984. С. 161—163.
- Хозимова Л. А., Радовская А. В., Селезнева Н. И., Калинина В. А. Определение фтор-иона в почвах // Почвоведение. 1979. № 11. С. 148—151.
- Хозимова Л. А., Радовская А. В., Круглова Н. В., Качалова Т. К. Определение фтора в растительном материале // Агрехимия. 1983. № 6. С. 66—72.
- Farrar H., Slavek F., Pickering W. F. Fluoride Sorption by Soil Components: Calcium Carbonate, Humic Acid, Manganese Dioxide and Silica // Austral Journal of Soil Research. 1985. V. 23. P. 429—439.
- Udrescu S., Lonescu A. Mori Anglia Calitatea solului si a recol felor in zone poluate cu pulberi, sulfsi fluor // Luer. Sti. A. Bucuresti, 1987. V. 30. P. 83-88.