

УДК 579.26

## ИЗУЧЕНИЕ ЭКОЛОГО-ТРОФИЧЕСКИХ ГРУПП ПОЧВЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Семенова И.Н., Ильбулова Г.Р., Суюндуков Я.Т.

*ГАНУ «Институт региональных исследований» Академии наук Республики Башкортостан,  
Сибай, e-mail: ifalab@rambler.ru*

В работе рассмотрена эколого-трофическая структура микробных сообществ почв, находящихся в зоне воздействия горнорудного производства. Установлено, что при приближении к источнику загрязнения почвы тяжелыми металлами увеличивается численность олиготрофной микрофлоры, удовлетворяющей свои потребности за счет веществ, постоянно присутствующих в почве и не нуждающихся в наличии легкодоступных источников энергии, в то время как количество аммонифицирующих микроорганизмов, наоборот, уменьшается. Загрязнение почв медью, цинком и другими металлами оказывает влияние на такие показатели микробиологической активности, как коэффициенты минерализации, педотрофности, сукцессии. Степень воздействия зависит от дозы токсиканта в почве, и выраженный эффект наблюдается лишь при высоких уровнях загрязнения.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, микробные сообщества, горнорудные предприятия

## STUDYING OF EKOLOGO-TROPHIC GROUPS OF SOIL MICROORGANISMS IN THE ZONE OF INFLUENCE OF MINING MANUFACTURE

Semenova I.N., Ilbulova G.R., Sujundukov J.T.

*Institute of regional researches, Academy of sciences of Republic Bashkortostan,  
Sibaj, e-mail: ifalab@rambler.ru*

The paper considers the ecological and trophic structure of soil microbial communities in the zone of influence of mining production. It is established that the approach to the source of soil contamination with heavy metals increases the number of oligotrophic microorganisms that satisfies their needs at the expense of substances constantly present in the soil and do not require the presence of readily available energy sources, while the number of microorganisms using organic nitrogen, on the contrary, decreases. Soil contamination with copper, zinc and other metals has an impact on such indicators of microbiological activity, the coefficients of mineralization, succession. The degree of impact depends on the dose of the toxicant in the soil, and a pronounced effect was observed only at high levels of pollution.

**Keywords:** heavy metals, microbic communities, the mining enterprises

В круговороте веществ в экосистемах Земли огромную роль играют микроорганизмы, являющиеся связующими звеньями в биологических циклах. Именно микроорганизмы выполняют функцию редуцентов экосистем, минерализуют органические вещества, тем самым превращая их в доступные для продуцентов соединения.

В почвах различных типов содержатся сообщества микроорганизмов с характерным видовым составом, разнообразием и количественным соотношением различных групп. В условиях повышенного антропогенного загрязнения структура микробных сообществ изменяется, при этом наблюдается уменьшение видового разнообразия почвенной микрофлоры, изменение представленности и появление не свойственных данным зональным условиям видов, утрата ряда особенностей пространственно-временной организации сообществ.

Под действием высоких доз тяжелых металлов происходит снижение количества микроорганизмов [7]. При техногенном загрязнении экосистем снижается как общая численность микроорганизмов, так и резко уменьшается содержание аммонификато-

ров и нитрификаторов, а количество денитрификаторов и олигонитрификаторов возрастает. Увеличивается также численность фосфатрастворяющих и железоредуцирующих бактерий, а численность целлюлозоразрушающих микроорганизмов имеет тенденцию к снижению [8].

Наиболее чувствительными к загрязнению почв являются аммонифицирующие бактерии, использующие минеральный азот, некоторые споровые бактерии, целлюлолитические бактерии и актиномицеты [3]. Однако не во всех случаях зафиксировано снижение численности почвенных микроорганизмов. В ряде работ отмечено увеличение общей численности микрофлоры [1, 4]. По предположению некоторых исследователей, это объясняется гибелью чувствительных микроорганизмов и активным развитием устойчивых форм, использующих в качестве питания энергетический материал погибших клеток. Имеются сведения об отсутствии достоверных изменений количества микроорганизмов в загрязненных почвах [9]. Ряд авторов указывает на обнаружение изменения численности микроорганизмов только при концентрации

загрязнителя, на два порядка превышающей фоновую [6, 7].

Тяжелые металлы, воздействуя на почвенные микроорганизмы, увеличивая численность одних (микроскопических грибов) и уменьшая численность других (бактерий, актиномицетов), приводят к изменению структуры микробного ценоза, вызывая сукцессионные изменения почвенного биоценоза. По степени толерантности к действию тяжелых металлов основные группы почвенных микроорганизмов располагаются следующим образом: микроскопические грибы > актиномицеты > бактерии > спорообразующие бактерии.

Цель данной работы – изучить экологотрофические группы микробных сообществ почв, подверженных загрязнению тяжелыми металлами со стороны горнорудного производства.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились в г. Сибай Республики Башкортостан в зоне влияния крупного предприятия – Сибайского филиала Учалинского горно-обогатительного комбината (СФ УГОК). Все пробные площадки (ПП) отбирались методом трансект по розе ветров в восточном, юго-восточном и северо-восточном направлениях на удалении 0,5; 5; 10 км от Сибайской обогатительной фабрики, рассматриваемой в качестве источника загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами (ИЗ) (рисунок). Почвенный покров пробных площадок представлен черноземом обыкновенным среднемощным среднегумусным (7-8%) легкоглинистым и тяжелосуглинистым. Почвообразующими породами являются делювиальные отложения. Характеризуется нейтральными и щелочными значениями кислотности (рН 6,0 и более). Содержание подвижного фосфора не превышает 4–6 мг на 100 г почвы, содержание общего калия колеблется от 1,2 до 2,4%, подвижного калия – от 10 до 50 мг на 100 г почвы. Преобладающие ветры – северо-западного и юго-западного направлений.



Расположение пробных площадок в зоне влияния СФ УГОК: в восточном направлении: ПП1 – 0,5 км, ПП2 – 5 км, ПП3 – 10 км, в юго-восточном: ПП4 – 5 км, ПП5 – 10 км, ПП6 – 15 км; в северо-восточном: ПП7 – 5 км, ПП8 – 10 км, ПП9 – 15 км от ИЗ

Валовое содержание металлов определяли методом атомной абсорбционной спектроскопии в лаборатории Центра агрохимической службы «Башкирский» РБ. В качестве экстрагента использовали 5 М  $\text{HNO}_3$ . Отбор проб и культивирование микроорганизмов проводили общепринятыми методами. Относительные показатели степени минерализации

органических веществ в почве определяли следующим образом: – коэффициент минерализации как отношение численности микроорганизмов, выросших на крахмало-аммиачном агаре (КАА), к численности микроорганизмов, выросших на мясо-пептонном агаре (МПА) (КАА/МПА); коэффициент олиготрофности как отношение численности микроорганизмов,

выросших на голодном агаре (ГА), к численности микроорганизмов, выросших на МПА (ГА/МПА); коэффициент педотрофности как отношение численности микроорганизмов, выросших на почвенном агаре (ПА), к численности микроорганизмов, выросших на МПА (ПА/МПА). Коэффициент сукцессии рассчитывали по формуле:

$$K = M/P,$$

где М – общее количество бактерий, учитываемых прямым методом микроскопии при окрашивании карболовым эритрозином; П – численность бактерий, учтенных на МПА.

### Результаты исследования и их обсуждение

В состав почвенной микрофлоры входят микроорганизмы с различными требованиями к условиям питания и источникам энергии. Количественные соотношения между ними зависят от экологических условий, в которых складывается тот или иной микробный ценоз. Впервые концепцию об эколого-трофических группах почвенной микрофлоры выдвинул Виноградский С.Н. [2], который описал две функционально различающиеся группировки микроорганизмов: зимогенную и автохтонную. Зимогенная микрофлора ответственна за разложение

свежих растительных остатков, автохтонная – за разложение гумуса. По современным представлениям, структура микробного ценоза, состоящая из зимогенной, автохтонной, олиготрофной и автотрофной групп микроорганизмов, непрерывно сменяется. Олиготрофы – эколого-трофическая группа микроорганизмов, удовлетворяющая свои пищевые потребности за счет постоянно присутствующих в почве веществ и в лабораторных условиях культивируется на голодном и почвенном агаре.

Длительная эксплуатация (более 50 лет) месторождений медно-колчеданных руд привела к загрязнению почв г. Сибай тяжелыми металлами, такими как цинк, медь, кадмий свинец и др. Установлено, что в радиусе 5 км от Сибайской обогатительной фабрики превышение ПДК в слое почвы 0–10 см составляло: для валового содержания меди в 14,3 раза, для цинка – в 5,8 раза. По мере удаления от обогатительной фабрики валовое содержание металлов в почве снижалось [5].

В табл. 1 приведены данные о численности микроорганизмов, относящихся к различным эколого-трофическим группам в почвах, расположенных на разном удалении от ИЗ.

Таблица 1

Количество микроорганизмов различных эколого-трофических групп в почвенном горизонте А исследуемых пробных площадок

№ п/п	Общее количество микроорганизмов, млн/г почвы	Микроорганизмы на МПА, млн клеток/г почвы	Микроорганизмы на КАА, млн клеток/г почвы	Микроорганизмы на ГА, млн клеток/г почвы	Микроорганизмы на ПА, млн клеток/г почвы
1	80000	5,8	3,5	0,832	2,280
2	140000	11,2	9	1,200	2,800
3	161000	17,6	11,6	0,680	0,480
4	181000	12	10,24	0,480	0,720
5	106000	10	9,6	0,408	1,240
6	112000	12,8	6,36	0	0,480
7	144000	5,04	12,6	1,160	2,400
8	199000	6,52	6,24	0,480	0
9	188000	12,76	18,4	0,800	0

Из изученных показателей достоверная корреляция с расстоянием от ИЗ ( $r = -0,76$ ) была выявлена только в случае количества микроорганизмов, учтенных на ПА. Следовательно, при приближении к ИЗ в структуре микробного сообщества увеличивается численность олиготрофной микрофлоры, удовлетворяющей свои потребности за счет веществ, постоянно присутствующих в почве и не нуждающихся в наличии легкодоступных источников энергии. Количество аммонификаторов, учитываемых на МПА,

напротив, было минимальным в 0,5 км от ИЗ, хотя достоверной корреляции между этим показателем и расстоянием от ИЗ обнаружено не было. Очевидно, что загрязненность почв тяжелыми металлами не является единственным фактором, оказывающим влияние на численность почвенных микроорганизмов.

Одним из показателей интенсификации минерализационных процессов в почве может быть соотношение бактерий, усваивающих органический и минеральный азот. В почвах с более энергичным процессом

минерализации микроорганизмы, усваивающие минеральный азот, обычно превышают по численности микрофлору, развивающуюся за счет органического азота.

Нами были изучены показатели мобилизационных процессов в почве, загрязненной тяжелыми металлами (табл. 2).

Наименьшее значение коэффициента минерализации было отмечено для целинных почв ПП6 в 15 км к юго-востоку от ИЗ с минимальным антропогенным воздействием. Практически на таком же уровне на-

ходился коэффициент минерализации почв, наиболее загрязненных тяжелыми металлами (ПП1). Наибольшее значение коэффициента минерализации было установлено для почв ПП7. Данный участок находится в 5 км в северо-восточном направлении от ИЗ, и превышение ПДК в его почвенном покрове отмечено только для цинка. Высокая активность минерализационных процессов на данном участке может быть связана с повышенной влажностью, обусловленной наличием близости водоема.

**Таблица 2**

Показатели микробиологической активности и валовое содержание металлов в почвенном горизонте А исследуемых пробных площадок

№ п/п	Коэффициенты				Валовое содержание металлов, мг/кг почвы							
	минерализации	олиготрофности	педотрофности	сукцессии	Cu	Zn	Cd	Pb	Fe	Mn	Co	Ni
1	0,60	0,14	0,39	13793,1	157,5	553,8	0,88	33,3	27803	990	12,4	28,7
2	0,80	0,11	0,25	12500,0	45,9	583,9	1,0	21,9	25240	1039	11,0	30,1
3	0,66	0,04	0,03	9147,7	29,4	104,0	0,78	18,1	24730	1051	11,2	28,6
4	0,85	0,04	0,06	15083,3	92,2	446,0	0,54	9,8	23520	1022	10,5	36,8
5	0,96	0,04	0,12	10600,0	25,9	108,2	0,98	17,3	25060	907	12,8	34,5
6	0,50	0,00	0,04	8750,0	29,9	124,1	0,72	20,9	24790	1138	13,1	31,3
7	2,50	0,23	0,48	28571,4	53,0	215,0	0,58	19,2	25030	1354	13,7	28,8
8	0,96	0,07	0,00	30521,5	49,4	142,2	1,0	17,1	29610	1182	20,1	41,6
9	1,44	0,06	0,00	14733,5	37,4	106,5	0,82	13,7	24990	977	12,0	28,3

В целом можно заключить, что загрязнение почв тяжелыми металлами оказывает влияние на активность процессов минерализации в ней, однако, очевидно, что этот фактор является не единственным, воздействующим на микроорганизмы.

В современной экологической терминологии принято подразделять микроорганизмы на г-стратегов, быстро развивающихся за счет легкодоступных соединений, содержащихся в высоких концентрациях в среде, и к-стратегов, способных к медленному росту за счет питательных субстратов, имеющих в незначительных концентрациях, уже не способных обеспечить рост г-стратегов. В каждой конкретной почве складываются своеобразные микробные ценозы, имеющие определенную структуру. Наряду с активно функционирующими группами микроорганизмов в почве содержится огромное количество пассивных группировок, так называемый микробный пул или запас микроорганизмов, не обеспеченных элементами питания и оптимальными физическими факторами среды, ожидающий благоприятных условий. Поступающее в почву органическое вещество может обеспечить в среднем не более нескольких генераций бактерий за год. Ми-

кробный пул обуславливает поддержание гомеостатического состояния почвы, т.е. постоянства химических и других свойств, характерных для данной почвы. При поступлении в почву свежего органического вещества или внесении удобрений в процесс их трансформации включаются микроорганизмы, которые должны привести систему почвы в состояние равновесия.

Сукцессию характеризует коэффициент сукцессии. Высокое значение этого коэффициента характеризует поздние стадии микробной сукцессии, где преобладают популяции К-отбора, низкое значение этого коэффициента указывает на увеличение доли быстрорастущих популяций г- отбора, что характерно для начальных этапов сукцессии.

В наших исследованиях минимальное значение коэффициента сукцессии было в почвах ПП 6 (15 км на юго-восток от ИЗ). Таким образом, почвенный покров данного участка характеризуется не только сниженной минерализационной активностью, но и начальным уровнем микробиологической сукцессии. Наибольшее значение коэффициента сукцессии было характерно для ПП 7 и 8 (5 и 10 км на северо-восток от ИЗ). Очевидно, что высокая активность мине-

рализационных процессов в данном случае привела к формированию зрелого микробного сообщества.

Резюмируя полученные результаты, можно заключить, что загрязнение почв тяжелыми металлами влияет на структуру микробного ценоза, изменяя численность и соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов. Однако степень этого влияния зависит от дозы токсиканта в почве, и выраженный эффект наблюдается при более высоких уровнях загрязнения. В целом, качественные и количественные характеристики микробных сообществ зависят от ряда различных факторов, помимо содержания в почве тяжелых металлов. Кроме того, как физиологическая активность, так и численность микроорганизмов являются предметом саморегуляции, а не механическим ответом на условия среды. Возможно, что эта высокая способность к саморегуляции в сочетании с избыточной биомассой и избыточным видовым разнообразием является основанием для устойчивости почвы к внешним воздействиям.

#### Список литературы

1. Булавко Г.И. Влияние различных соединений свинца на почвенную микрофлору // Изв. Сиб. отд. АН СССР. – 1982. – Вып. 1. Сер. биол. – №5. – С. 79–86.
2. Виноградский С.Н. Микробиология почвы. – М.: АН СССР, 1952. – 792 с.
3. Евдокимова Г.А., Кислых Е.Е., Мозгова Н.П. Биологическая активность почв в условиях аэротехногенного загрязнения на Крайнем Севере. – Л., 1984. – 120 с.
4. Загуральская Л.М., Зябченко С.С. Воздействие промышленных загрязнений на микробиологические процессы в почвах бореальных лесов района Костамукши // Почвоведение. – 1994. – №5. – С. 105–110.
5. Ильбулова Г.Р. Биологическая активность почв Зауралья Республики Башкортостан в условиях техногенного загрязнения предприятиями горнорудного комплекса: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Уфа, 2009. – 18 с.
6. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 232 с.
7. Тяжелые металлы как фактор антропогенного воздействия на почвенную микробиоту / С.В. Левин и др. // Микроорганизмы и охрана почв. – М., 1989. – С. 5–46.
8. Сорокин Д.Ю. Окисление соединений азота гетеротрофными организмами // Успехи микробиологии. – М.: Наука, 1990. – Т. 24. – С. 100–127.
9. Wang W. The response of Nitrobacter to toxicity // Environ. Int. – 1984. – Vol. 10, №1. – P. 21–26.

#### Рецензенты:

Мазгаров И.Р., д.б.н., профессор, зав. кафедрой физиологии человека и животных Сибайского института Башгосуниверситета, г. Сибай;

Янтурин С.И., д.б.н., профессор, зав. кафедрой экологии Сибайского института Башкирского госуниверситета, г. Сибай.

Работа поступила в редакцию 25.10.2011.