

**Сравнительный анализ специфики почвенных
альго-микологических комплексов в зоне действия
объекта хранения и уничтожения химического оружия
«Марадыковский»**

©2012. Л. И. Домрачева^{1,2}, д.б.н., профессор,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д.т.н., зав. кафедрой, зав. лабораторией,
Л. В. Кондакова^{2,3}, к.б.н., зав. кафедрой, Е. В. Дабах^{1,2}, к.б.н., доцент,
Т. С. Елькина¹, аспирант,

¹Вятская государственная сельскохозяйственная академия,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

³Вятский государственный гуманитарный университет,
nm-flora@rambler.ru

Изучена специфика альго-циано-микологических комплексов почв в районе действия объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» на территории Кировской области. Во временном аспекте показаны особенности количественной трансформации данных комплексов.

Specific features of algocyanomycological complexes in soil in the vicinity of the chemical weapons decommission plant «Maradykovsky» in Kirov region are presented. Quantitative data transformation of the complexes is shown in development.

Ключевые слова: биомониторинг, водоросли, цианобактерии, микромицеты

Keywords: biomonitoring, algae, cyanobacteria, fungi

Мониторинговый поиск в оценке состояния окружающей среды выявил достаточно широкий круг биоиндикаторов и тест-организмов. Было показано, в частности, что требованиям, которые предъявляют к данной группе организмов, вполне соответствуют такие представители почвенной микробиоты, как водоросли, цианобактерии (ЦБ) и микромицеты [1, 2]. Исследование особенностей подобных микробных комплексов проводилось нами в рамках фонового мониторинга строящегося объекта по хранению и уничтожению химического оружия (ХО) «Марадыковский» в 2004 и 2005 гг., а затем и действующего объекта в 2007 и 2012 гг. Первоначально сеть мониторинга включала более полутора сотен участков. Определение количественных характеристик водорослевых и грибных популяций на этих участках в почвах различных фитоценозов в 2004 и 2005 гг. позволило выявить следующие закономерности [3]:

1. Микробными доминантами в зоне действия арсенала ХО являлись микромицеты, биомасса которых в отдельных точках достигала свыше 3 т/га, а длина мицелия – 900–1200 м/г. При этом наибольшие

запасы грибной биомассы характерны для подзолистых лесных почв. Замедленное развитие грибов фиксировалось в луговых фитоценозах на дерново-подзолистых почвах лёгкого гранулометрического состава, а также в болотно-подзолистой и дерново-глеевой почвах, где их биомасса не превышала 600–800 кг/га, а длина мицелия 50–400 м/г.

2. В почвенных пробах с повышенным содержанием таких поллютантов, как мышьяк и свинец, в структуре грибного мицелия преобладали меланизированные формы. Известно, что именно меланинам приписывают важную роль в адсорбции и детоксикации поллютантов. Поэтому доминирование меланинсодержащих микромицетов является косвенным доказательством наличия в почве соединений, обладающих жёстко депрессивным действием на микробиоту.

3. Химическое загрязнение почвы провоцирует массовое размножение грибов р. *Fusarium*. Плотность их макроконидий в отдельные сроки наблюдения достигала 200 тыс./г. Подобная плотность грибных спор в природе наблюдается в период фузариозных эпифитотий. Грибы этого рода известны как активные

фитопатогены и продуценты сильнейших микотоксинов. Поэтому накопление в почве фузариозного потенциала – один из показателей её фитотоксичности.

4. Запасы водорослевой биомассы существенно ниже грибной. Так, одномоментная масса зелёных водорослей не превышала 50 кг/га, у диатомей достигала до 1,8 т/га (болотные почвы). Однако вследствие высокой скорости обновления и интенсивности продукционного процесса биомасса водорослей играет существенную роль в питании почвенных беспозвоночных и активизации сапротрофного микробного комплекса [4].

5. Видовое обилие альгофлоры в почвах луговых и лесных фитоценозов района объекта «Марадыковский» насчитывает 125 видов водорослей и ЦБ, в том числе Cyanophyta – 41 (32,8%), Bacillariophyta – 11 (8,8%), Xanthophyta – 18 (14,4%), Eustigmatophyta – 4 (3,2%), Chlorophyta – 50 (40,0%), Euglenophyta – 1 (0,8%). Из 70 видов почвенных водорослей лесных фитоценозов нами отмечено преобладание зелёных водорослей – 44,3% (представители родов *Chlamydomonas*, *Coccomyxa*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*) и жёлтозелёных – 15 видов (виды родов *Pleurochloris*, *Botrydiosis*, *Characiopsis*). Почвы луговых фитоценозов имеют более богатую альгофлору. Из 117 выяв-

ленных видов преобладают зелёные водоросли (40,2%) и ЦБ (30,8%). Среди ЦБ интенсивно развиваются в культуре виды *Nostoc*, *Phormidium*, *Oscillatoria*, *Cylindrospermum*. Среди зелёных водорослей основную роль играют представители родов *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Klebsormidium*, *Chlorococcum*. Диатомеи представлены родами *Pinnularia*, *Navicula*, *Hantzschia*.

Дальнейшее исследование состояния микробиоты было проведено в начале действия объекта хранения и уничтожения химического оружия (ОХУХО) в 2007 г. и позднее – осенью 2012 г. При этом почвенные образцы отбирались не со всех участков первоначального мониторинга. В 2007 г. анализировалось состояние альго-микологических комплексов на 11 площадках мониторинга (ПМ), а в 2012 г. – на 9.

Анализ результатов, полученных в ходе исследований в 2007 г., показал [5], что интенсивность развития микробных группировок после начала действия ОХУХО несущественно отличается от показателей, которые определялись в 2004–2005 гг. Так, длина мицелия варьировала в широком диапазоне – от 12,7 до 814,8 м/г (табл. 1), отражая известный факт, что максимальное развитие мицелия характерно для подзолистых почв, минимальное наблюдается в гумусовых горизонтах заброшенных пахотных дерново-подзолистых

Таблица 1
Микологические показатели состояния почв на площадках мониторинга (ПМ) в 2007 г.

Номер ПМ	Почва	Длина мицелия, м/г			Структура популяций, %	
		бесцветного	окрашенного	суммарная	БМ	ММ
3	Подзолистая антропогенно нарушенная	111,4±25,6	31,7±1,9	143,1±27,5	77,9	22,1
6	Дерново-глеевая антропогенно нарушенная	10,7±1,6	5,5±0,9	16,2±2,5	66,1	33,9
17	Подзолистая	86,4±11,7	241,6±11,8	328,0±23,5	26,3	73,7
36	То же	333,8±131,2	481,0±17,4	814,8±148,6	41,0	59,0
28	То же	149,8±57,6	550,4±83,2	700,2±140,8	21,4	78,6
30	То же	124,2±51,2	406,1±22,7	530,3±73,9	23,4	76,6
55	То же	108,5±33,6	220,2±26,9	328,7±60,5	33,0	67,0
45	Дерново-подзолистая нарушенная	23,7±4,3	9,0±2,7	32,7±7,0	72,5	27,5
52	Антропогенно нарушенная	4,1±0,6	8,6±1,6	12,7±2,2	32,2	67,8
53	То же	23,3±6,3	30,2±1,4	53,5±7,7	43,6	56,4
39П	Антропогенно нарушенная подзолистая	88,5±6,7	68,8±3,2	157,3±9,9	56,3	43,7

Примечание: БМ – микромицеты с бесцветным мицелием, ММ – микромицеты с меланизированным мицелием.

Таблица 2

Показатели состояния фототрофных микробных комплексов почв на площадках мониторинга (ПМ) в 2007 г.

Номер ПМ	Численность клеток фототрофов, тыс./г			Всего
	Зелёные водоросли	Диатомеи	Цианобактерии	
3	1530±180	70±12	–	1600±192
6	530±83	33±0	–	563±83
17	720±30	180±15	2250±290	3150±335
36	170±50	–	270±80	440±130
28	1000±177	67±14	760±116	1827±307
30	200±17	33±7	4370±600	4603±624
55	200±10	30±0	1097±109	1327±119
45	1023±140	67±12	670±110	1760±262
52	530±37	–	–	530±37
53	430±60	870±35	930±40	2230±135
39П	3230±300	33±0	930±130	4193±430

Примечание: «–» – данная группа фототрофов при прямом микроскопическом учёте не обнаружена.

Таблица 3

Миколого-цианобактериальные показатели загрязнения подзолистой почвы на площадках мониторинга (ПМ)

Номер ПМ	Доля меланинсодержащих грибов в структуре грибной популяции (%)	Доля цианобактерий в структуре фототрофной популяции (%)
17	73,7	71,4
36	59,0	61,4
30	76,6	95,0
55	67,0	82,7

почв (ПМ 45), в нарушенных дерново-глеевых почвах (ПМ 6) и сильно загрязнённых, переувлажнённых и перерытых почвах (ПМ 52). Одним из критериев техногенного загрязнения почвы служит увеличение в ней доли меланизированных грибов.

В семи из 11 проанализированных образцов данный показатель превышает 50%, что может свидетельствовать о наличии в почве каких-либо поллютантов, но не вскрывает их природу.

Для дифференцирования характера загрязнения необходимо проведение химического анализа. Достоинство микологического метода индикации состояния почвы как раз и состоит в том, что он позволяет оценить уровень загрязнения почвы до проведения дорогостоящих химических анализов и определить их первоочерёдность [6].

Результаты параллельного альгологического анализа показали, что в исследуемых почвах численность фототрофных микроорганизмов также колеблется в значительных пределах – от 440 тыс. до 4,6 млн. клеток в 1 г почвы (табл. 2).

Примечательно, что в разных почвах доминировали различные группировки фототро-

фов. Так, в антропогенно нарушенных почвах основной вклад в создание первичной продукции вносят эукариотные зелёные и диатомовые водоросли (ПМ 3, 6, 45, 52, 53, 39П). Максимум развития прокариотных фототрофов ЦБ наблюдается на тех участках, где доминируют меланинсодержащие грибы (коэффициент корреляции между этими группировками равен 0,75) (табл. 3).

При проведении альго-микологических анализов в 2012 г. отбор почвенных образцов проводился с девяти ПМ. Изучение количественных параметров микоценозов показало, что на исследуемых участках суммарная длина грибного мицелия колеблется от 28,6 до 390 м/г (табл. 4), при этом доминирование тёмноокрашенных форм микромицетов отмечено на ПМ 3, 17, 34, 36, 60. Максимальная величина этого показателя (73,1–74,9%) характерна для ПМ 17 и 36.

Сравнение структуры популяций микромицетов в почве четырёх ПМ (3, 17, 36 и 39П) показывает (табл. 5), что за 5 лет повысилась степень доминирования меланизированных микромицетов на трёх ПМ (3, 17, 36), при этом на двух ПМ (36 и 39П) произошло существенное снижение суммарной длины грибного ми-

Таблица 4

Микологические показатели состояния почв на площадках мониторинга (ПМ) в 2012 г.

Номер ПМ	Почва	Длина мицелия, м/г			Структура популяций, %	
		бесцветного	окрашенного	суммарная	БМ	ММ
3	Подзолистая антропогенно нарушенная	81,3 ± 16,0	85,1 ± 22,4	166,4 ± 38,4	48,8	51,2
17	Подзолистая	78,4 ± 3,2	212,8 ± 26,6	291,2 ± 31,8	26,9	73,1
34	То же	260 ± 50	130 ± 50	390 ± 100	40,1	59,9
36	То же	46,7 ± 10,9	139,2 ± 25,6	185,9 ± 36,5	25,1	74,9
39П	Антропогенно нарушенная подзолистая	21,4 ± 12,8	15,7 ± 2,6	37,1 ± 15,4	57,7	42,3
43	Дерново-подзолистая легко суглинистая	14,7 ± 2,9	10,6 ± 1,4	25,3 ± 4,3	58,1	41,9
54	Аллювиальная дерновая среднесуглинистая	220 ± 40	100 ± 0	320 ± 40	73,8	26,2
60	Дерново-подзолистая супесчаная	24,3 ± 4,8	26,9 ± 6,4	51,2 ± 11,2	47,5	52,5
84	Дерново-слабоподзолистая супесчаная	16,9 ± 6,4	11,7 ± 2,2	28,6 ± 8,6	59,0	41,0

Примечание: БМ – микромицеты с бесцветным мицелием, ММ – микромицеты с меланизированным мицелием.

Таблица 5

Сравнительная характеристика микоценозов почвы на площадках мониторинга (ПМ) в 2007 и 2012 гг.

Номер ПМ	Год	Длина мицелия, м/г	Микромицеты с бесцветным мицелием, %	Микромицеты с окрашенным мицелием, %
3	2007	143,0	77,9	22,1
	2012	166,4	48,8	51,2
17	2007	241,6	73,7	26,3
	2012	291,2	26,9	73,1
36	2007	814,8	41,0	59,0
	2012	185,9	25,1	74,9
39П	2007	157,3	56,3	43,7
	2012	37,1	57,7	42,3

Таблица 6

Показатели состояния фототрофных микробных комплексов почв на площадках мониторинга (ПМ) в 2012 г.

Номер ПМ	Численность клеток фототрофов, тыс./г			Всего
	Зелёные водоросли	Диатомеи	Цианобактерии	
3	400 ± 60	30 ± 0	2530 ± 400	2960 ± 460
17	450 ± 14	300 ± 16	–	750 ± 30
34	260 ± 50	130 ± 50	–	390 ± 100
36	380 ± 70	–	–	380 ± 70
39П	280 ± 70	100 ± 0	780 ± 100	1160 ± 170
43	270 ± 50	140 ± 50	500 ± 100	910 ± 200
54	220 ± 40	100 ± 0	970 ± 200	1290 ± 240
60	517 ± 40	280 ± 40	730 ± 130	1527 ± 210
84	730 ± 80	150 ± 50	530 ± 150	1410 ± 280

Примечание: «–» – данная группа фототрофов при прямом микроскопическом учёте не обнаружена.

Таблица 7

Сравнительная характеристика альгоценозов почвы на площадках мониторинга (ПМ) в 2007 и 2012 гг.

Номер ПМ	Год	Численность водорослей, тыс. кл./г	Численность цианобактерий, тыс. кл./г	Суммарная численность фототрофов, кл./г
3	2007	1597	–	1597
	2012	430	2530	2960
17	2007	900	2250	3150
	2012	750	–	750
36	2007	170	270	440
	2012	380	–	380
39П	2007	3263	930	4193
	2012	880	530	1410

Примечание: «–» – данная группа фототрофов при прямом микроскопическом учёте не обнаружена.

целия, что может быть связано с уменьшением количества попадающего в почву растительного опада.

В развитии фототрофных группировок выделяются следующие особенности (табл. 6): максимальные показатели обилия фототрофных популяций находятся на уровне 3 млн. кл./г почвы (ПМ 3), минимальные показатели колеблются от 380 тыс. до 750 тыс. кл./г; в почве трёх из девяти ПМ не обнаружены ЦБ; наиболее равномерный характер размножения фототрофов присущ зелёным водорослям.

Сравнение особенностей развития фототрофных популяций в разные годы (2007 и 2012) показывает, что во всех случаях, кроме почвенных образцов с ПМ 3, в 2012 г. наблюдается снижение суммарной численности фототрофов, особенно ярко выраженное на ПМ 17 и 39П (табл. 7).

Особенно нестабильным оказалось развитие ЦБ, хотя почвенные образцы были отобраны в благоприятные для размножения ЦБ

сроки (сентябрь), тем не менее зафиксировано их отсутствие на ПМ 17 и 36. В то же время на ПМ 3 численность популяций ЦБ превышает 2,5 млн. кл./г почвы, хотя в 2007 г. эта группа прокариотных водорослей на данном участке в сентябре не была выявлена при прямом микроскопическом учёте. Отсутствие ЦБ на определённых ПМ может быть как следствием затягивания хода сезонной сукцессии в данной почве, так и изменением экологических параметров почвы в сторону, неблагоприятную для ЦБ (величина рН, минимальное содержание фосфора и т. д.).

Сравнение характера развития фототрофных и грибных комплексов в подзолистой почве на ПМ 3, 17, 36, 39П в три срока наблюдения (2005, 2007 и 2012 гг.) показало, что за годы исследований минимальный микробный пул фототрофов практически не снизился (рис. 1), хотя динамика численности водорослей и ЦБ носит различный характер на разных ПМ. Резкое последовательное возрас-

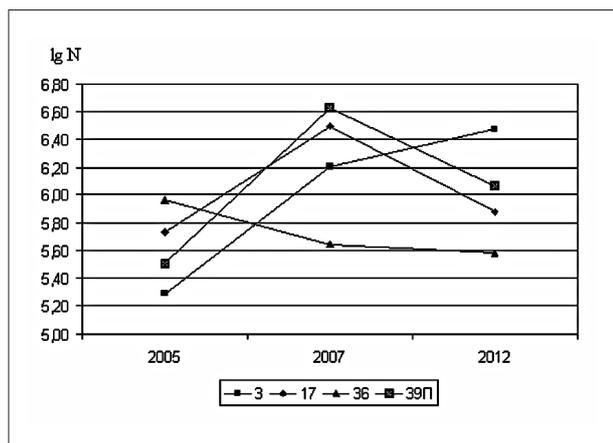


Рис. 1. Динамика численности фототрофных микроорганизмов в почве в зоне действия объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» в 2005–2012 гг. (3, 17, 36, 39П – площадки мониторинга)

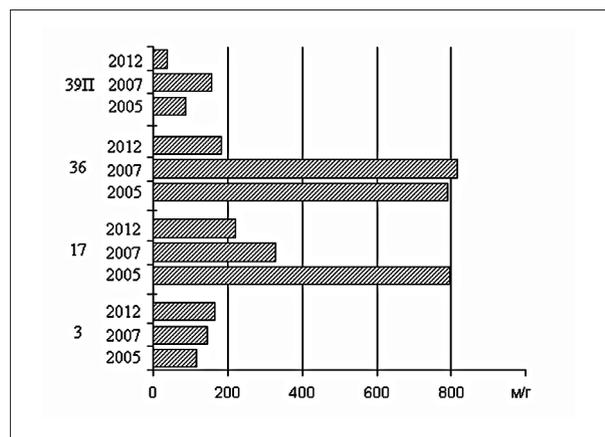


Рис. 2. Длина мицелия микромицетов в почве в зоне действия объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» в 2005–2012 гг. (3, 17, 36, 39П – площадки мониторинга)

тание фототрофных популяций произошло в почве ПМ 3 от 194 тыс. кл./г в 2005 г. до почти 3 млн. кл./г в 2012 г. На двух ПМ (17 и 39П) пик численности наблюдается в 2007 г., а на ПМ 36 происходит неуклонное снижение численности фототрофных популяций по годам.

Динамика развития грибной флоры, выраженная через длину мицелия, показывает относительную стабильность этого показателя на ПМ 3 при очень незначительной абсолютной суммарной длине мицелия – менее 200 м/г (рис. 2). В то же время на ПМ 17 и 36 в 2012 г. произошло существенное уменьшение этого показателя по сравнению с предыдущими годами. Для ПМ 39П характерны минимальные показатели длины мицелия, которые лежат в пределах 37–157 м/г.

Таким образом, изучение особенностей развития внутрипочвенных группировок микроорганизмов, включающих водоросли, ЦБ и микромицеты, показало, что за годы действия ОХУХО в целом не произошло катастрофического снижения плотности изучаемых микробных популяций. В то же время произошло существенное возрастание в структуре популяций микромицетов с меланизированным мицелием на ПМ 3, 17 и 36. Изменения наблюдаются в подзолистой антропогенно нарушенной почве ПМ 3, обусловленные стимуляцией размножения ЦБ, что привело к возрастанию общей численности фототрофов и увеличению длины мицелия.

Литература

1. Биоиндикаторы и биотестсистемы в оценке окружающей среды техногенных территорий / Под общ. ред. Т.Я. Ашихминой и Н.М. Алалыкиной. Киров: О-Краткое, 2008. 336 с.
2. Биологический мониторинг природно-техногенных систем / Под общ. ред. Т.Я. Ашихминой, Н.М. Алалыкиной. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2011. 388 с.
3. Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я., Дабах Е.В., Кондакова Л.В., Кантор Г.Я., Огородникова С.Ю., Варакина А.И. Микробиологические аспекты в экологическом мониторинге почв в районе объекта хранения химического оружия // Экология и биология почв: проблемы диагностики и индикации. Матер. междунар. научн. конф. Ростов-на-Дону. 2006. С. 158–161.
4. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2005. 336 с.
5. Кондакова Л., Домрачева Л., Дабах Е., Плетнёва А. Принципы диагностики состояния почвы с использованием количественных характеристик альгомикологических комплексов // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2008. № 6. С. 12–15.
6. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Домнина Е.А., Кантор Г.Я., Кочурова Т.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Панфилова И.В. Система биологического мониторинга компонентов природной среды в районе объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 4. С. 32–38.