

УДК 581.557.24

## МИКОРИЗООБРАЗОВАНИЕ ТРАВЯНИСТЫХ ВИДОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННЫХ ЭДАФОТОПОВ

© Н. В. Лукина\*, Т. С. Чибрик, Е. И. Филимонова, М. А. Глазырина

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина  
Россия, 620083 г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Тел.: +7 (343) 261 74 95.

\*Email: tamara.chibrik@urfu.ru

*В статье представлены результаты изучения микоризы на промышленных отвалах с повышенным содержанием тяжелых металлов в субстрате. У большинства травянистых видов обнаружена арбускулярная микориза, большая часть видов являются слабомикотрофными. Установлено, что в надземной части растений происходит активное накопление фосфора, а в корнях – металлов.*

**Ключевые слова:** фиторемедиация, арбускулярная микориза, промышленные отвалы, тяжелые металлы.

### Введение

В настоящее время в индустриальных регионах зачастую образуются техногенные геохимические аномалии, связанные с деятельностью промышленных предприятий как горнодобывающей, так и перерабатывающей промышленности, являющиеся источником загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.

Фиторемедиация – один из наиболее эффективных методов очистки почвы от тяжелых металлов с помощью растений, способных аккумулировать их в надземной части. Известно, что важную роль в этом процессе играет арбускулярная микориза, способствующая накоплению растениями Cu, Ni, Pb, Zn и др. [1], и в то же время снижающая токсический эффект металлов [2–5]. Установлено, что поглощение тяжелых металлов грибами, образующими арбускулярную микоризу, часто приводит к повышению их концентрации в корнях, но при этом и к ограничению их транспорта в побеги [6–8]. Механизм основан на связывании металлов на поверхности гиф [9], изменению их доступности в почве [10] и возможности изолирования их в гифах грибов без дальнейшей передачи растению [11]. Вместе с тем, еще много противоречивых данных по накоплению растениями металлов и очень мало данных о функционировании симбиоза в условиях загрязнения субстратов тяжелыми металлами. Данный фактор необходимо учитывать при изучении восстановления растительности на территориях загрязненных тяжелыми металлами, так как грибы-микоризообразователи могут играть большую роль в фитостабилизации, путем влияния на рост и развитие растений [12–16].

В связи с этим целью наших исследований было изучение особенностей микоризообразования в растительных сообществах, формирующихся на промышленных отвалах, в условиях загрязнения металлами.

### Объекты и методы

Исследования проводились в растительных сообществах, формирующихся на промышленных отвалах, расположенных на Среднем Урале.

Объекты исследования: шламохранилище Богословского алюминиевого завода (БАЗа), хвостохранилище Качканарского горно-обогатительного комбината (ГОКа) (таежная зона, подзона средней тайги), золоотвал Верхнетагильской государственной районной электростанции (ВТГРЭС) (таежная зона, подзона южной тайги). Для всех объектов характерен недостаток доступных для растений элементов минерального питания, в частности азота, подвижных форм фосфора и калия, реакция среды от слабо- до сильнощелочной (подробная характеристика объектов представлена в работе [17].

Шламохранилище БАЗа относится по происхождению к наливным отвалам перерабатывающей промышленности. Красный шлам – отход глиноземного производства, представляет собой порошкообразную слабощементированную массу красновато-коричневого цвета. В валовом химическом составе шлама преобладают окислы металлов, большую часть из которых составляют окислы Fe и Al, содержание которых в десятки раз выше, чем в окружающей отвал почве, pH субстрата – 9.1–9.9.

В хвостохранилище Качканарского ГОКа складированы шламы, полученные при обогащении железной руды. Шлам – бесструктурный субстрат, состоящий из рудных (магнетит, сростки магнетита с пироксеном и амфиболом) и нерудных (пироксен, амфибол, плагиоклаз) минералов. Валовый химический анализ шлама показывает, что основу его составляют силикаты с высоким содержанием Fe и окислов Fe, в шламе в избытке содержатся Mn, Cu, Co, Zn, Ni, pH шлама – 7.4.

Золоотвал Верхнетагильской ГРЭС образован золой бурых углей Челябинского и Богословского месторождений. Валовый химический состав золы соответствует алюмосиликатным образованиям. Содержание SiO<sub>2</sub> в золе различных углей колеблется от 40.5 до 50.3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – от 12.9 до 32.4 и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – от 5.5 до 17.7%; pH золы углей – от 6.2 до 8.5.

Для изучения микоризы в растительных сообществах отвалов отбирались корни травянистых растений в десятикратной повторности. Отобран-

ные образцы обрабатывались по общепринятой методике: окрашивание в анилиновой сини после мацерации в КОН. Были изучены такие параметры, как: доля участия микотрофных видов в растительных сообществах, степень микотрофности (D, отражает обилие гриба в корнях растений), интенсивность микоризной инфекции (C, отражает как распределение огрибленных участков корня, так и обилие гриба в нем) [12].

### Результаты исследований

Проведенные исследования показали, что в растительных сообществах всех объектов в корнях травянистых растений имеется арбускулярная микориза, характеризующаяся локализацией микоризообразующего гриба в мезодерме, отсутствием гриба в меристематических тканях корня и в центральном цилиндре, наличием в тканях коры гиф, единичных везикул и крайне малого числа арбускулов или зернистой массы. Малое количество арбускулов может быть связано с недостатком фосфора в субстрате [18].

**Изучение микоризы на шламохранилище БАЗа.** Для изучения микоризы на шламохранилище БАЗа были отобраны образцы корней 28 видов травянистых растений, встречающихся на берегах шламохранилища. Проведенные исследования показали, что 24 вида (85.7%) имеют арбускулярную микоризу. Средняя степень микотрофности (D) – 0.58 ± 0.14 балла, средняя интенсивность микоризной инфекции (C) – 14.2 ± 2.91%.

Большинство исследованных видов являются слабомикотрофными (75.0%). Среднемикотрофными оказались: *Saussurea amara* (L.) DC. (D=3.01), *Crepis tectorum* L. (D=2.09), *Erigeron acris* L. (D=1.80). Не микотрофные виды: *Chenopodium rubrum* L., *Erysimum cheirantoides* L., *Euphrasia pectinata* Ten., *Trifolium repens* L.

Химический анализ растений, выросших на шламовом отвале, выявил повышенное содержание в них (по сравнению с контролем) Fe и Al. В корневой системе растений Fe и Al было в несколько раз больше, чем в надземной фитомассе [19].

**Изучение микоризы на хвостохранилище Качканарского ГОКа.** Для изучения микоризы на хвостохранилище Качканарского ГОКа были отобраны образцы корней 13 травянистых видов, произрастающих вдоль дамб отвала. Исследования показали, что 11 из них, что составило 84.6%, являются микотрофными. Не микотрофным оказался один вид – *Rumex confertus* Willd. Все микотрофные

виды – слабомикотрофны. Средняя степень микотрофности (D) – 0.24 ± 0.06 балла, средняя интенсивность микоризной инфекции (C) – 5.6 ± 1.31%.

Определение коэффициента биологического поглощения микроэлементов в растениях, выращенных на хвостохранилище Качканарского ГОКа, показало, что среди микроэлементов, способных оказать токсическое влияние на растения, в субстрате выявлены Ni и Zn. Установлено, что они почти не поглощаются растениями. В то же время Р, при недостатке его содержания в подвижной форме, энергично поглощается растениями [20].

**Изучение микоризы на золоотвале ВТГРЭС.** На части золоотвала в 1968–1970 гг. была начата биологическая рекультивация, которая продолжалась в последующие годы. Применялось нанесение слоя глинистого грунта толщиной 10–15 см полосами шириной 6–10 м с таким же по размеру междуполосным пространством. Большинство полос было засеяно многолетними травами, часть отвала была оставлена под самозарастание. В результате проведенных работ образовался разнообразный спектр экотопов, включающий: участки не рекультивированной территории на «чистой» золе, первично рекультивированная территория с полосным нанесением грунта, вторично рекультивированная территория после раскорчевки кустарников и сплошного нанесения слоя торфа, толщиной 15–20 см.

Изучение микоризы проводилось в растительных сообществах на золе, на полосах грунта и на участке после вторичной рекультивации на торфе (табл. 1). Как видно из таблицы, наиболее высокие показатели степени и интенсивности микоризной инфекции у растений, произрастающих на полосах грунта. Большинство видов оказались слабомикотрофными: на золе 37 (88.1%) видов, на грунте – 18 (94.7%), на торфе – 25 (96.2%). Исследования показали, что на золе не микотрофными оказались: *Erysimum hieracifolium* L., *Euphrasia pectinata* Ten., *Berteroa incana* (L.) DC., на торфе – *Melandrium noctiflorum* (L.) Fries. К среднемикотрофным на золе отнесены *Vicia cracca* L., *Plantago media* L., на грунте – *Picris hieracioides* L.

На золоотвале ВТГРЭС нами было проведено изучение содержания тяжелых металлов в системе «субстрат – растение». Спектральный анализ показал, что и в золе, и в грунте, и в торфе наблюдается повышенное содержание тяжелых металлов, по сравнению с почвами Урала. Так содержание Ni

Таблица 1

Характеристика показателей эндомикоризы травянистых видов в растительных сообществах ВТГРЭС

Показатели микоризы	Участок самозарастания		Культурфитоценоз (торф)
	зола	грунт	
Количество исследованных видов, шт.	42	19	26
Доля микотрофных видов, %	93	100	96
Средняя степень микотрофности (D) растений, балл	0.48±0.07	0.84±0.12	0.45±0.07
Средняя интенсивность микоризной инфекции (C), %	10.42±1.55	16.85±2.38	9.46±1.36

почти в 2 раза выше, Zn – в 2.8–3.4, Pb – в 3.6–4.3, Cu – в 5.5–8.6 раз выше, чем в почве. Изучение химического состава растений показало, что в корнях растений происходит активное накопление Ni, Zn, Pb, Cu и других микроэлементов на всех трех участках золоотвала, а в надземной биомассе интенсивно накапливается только P, особенно на золе.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что на промышленных отвалах с повышенным содержанием в субстрате металлов и с недостатком доступных элементов питания, травянистые растения вступают в симбиоз с грибами, образуя арбускулярную микоризу. Большинство исследованных видов являются слабомикотрофными. В надземной массе растений на изученных отвалах происходит накопление фосфора, а в подземной массе – металлов. На техногенных объектах при недостатке доступных растениям элементов минерального питания (особенно азота и фосфора), неблагоприятном водном и воздушном режиме, наличие микоризы является важным фактором адаптации растений к измененным условиям среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания УрФУ № 2014/236, код проекта 2485.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Killham K., Firestone M. K. Vesicular-arbuscular mycorrhizal mediation of grass response to acidic and heavy-metal depositions // *Plant and Soil*. 1983. Vol. 72. P. 39–48.
2. Weissenhorn I., Leyval C., Belguy G., Berthelin J. Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil // *Mycorrhiza*. 1995. Vol. 5. P. 245–251.
3. Joner E. J., Leyval C. Time-course of heavy-metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimens // *Biology and Fertility of Soils*. 2001. Vol. 33. P. 351–357.
4. Andrade S. A. L., Abreu C. A., Silveira A. P. D. Influence of lead additions on arbuscular mycorrhiza and *Rizobium* symbioses under soybean plants // *Applied Soil Ecology*. 2004. Vol. 26. P. 945–954.
5. Janouskova M., Pavlikova D., Macek T., Vosatka M. Arbuscular mycorrhiza decreases cadmium phytoextraction by transgenic tobacco with inserted metallothionein // *Plant and Soil*. 2005. Vol. 272. P. 29–40.
6. Rufyikiri G., Huysmans L., Wannijn J., Van Hees M., Leyval C., Jakobsen I. Arbuscular mycorrhizal fungi can decrease the uptake of uranium by subterranean clover grown at high levels of uranium in soil // *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 130. P. 427–436.
7. Chen B. D., Borggaard O. K., Zhu Y. G., Jakobsen I. Mycorrhiza and root hairs barley enhance acquisition of phosphorus and uranium from phosphate rock but mycorrhiza decreases root to shoot uranium transfer // *New Phytologist*. 2005. Vol. 165. P. 591–598.
8. Turnau K., Kottke I., Oberwinkler F. Element localization in mycorrhizal roots of *Pteridium aquilinum* L. Kuhn collected from experimental plots treated with cadmium dust // *New Phytologist*. 1993. Vol. 123. P. 313–324.
9. Joner E. J., Briones R., Leyval C. Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium // *Plant and Soil*. 2000. Vol. 226. P. 227–234.
10. Citterio S., Santagostino A., Fumagalli P., Prato N., Ranalli P., Sgorbati S. heavy metal tolerance and accumulation of Cd, Cr and Ni by *Cannabis sativa* L. // *Plant and Soil*. 2003. Vol. 256. P. 243–252.
11. Christie P., Li X. L., Chen B. D. Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc // *Plant and Soil*. 2004. Vol. 261. P. 209–217.
12. Селиванов И. А. Микосимбиотрофизм, как форма консортивных связей в растительном покрове Советского Союза. М.: Наука, 1981. 230 с.
13. Каратыгин И. В. Козволюция грибов и растений. СПб.: Наука, 1993. 119 с.
14. Brandrett M. C. Diversity and classification of mycorrhizal association // *Biol. Rev.* 2004. Vol. 79. P. 473–495.
15. Booth M. G. Mycorrhizal networks mediate overstorey – understorey competition in a temperate forest // *Ecol. Letters*. 2004. Vol. 7. P. 538–546.
16. Read D. J., Leake J. R., Pevez-Moreno J. Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes // *Can. J. Bot.* 2004. Vol. 82. P. 1243–1263.
17. Чибрик Т. С., Лукина Н. В., Филимонова Е. И., Глазырина М. А. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2011. 286 с.
18. Проворов Н. А., Воробьев Н. И. Генетические основы эволюции растительно-микробного симбиоза. СПб.: Информ-Навигатор, 2012. 400 с.
19. Дробиз Ф. Д., Мельникова Э. И., Шилова И. И. Содержание железа и алюминия в растениях, выращенных на красном шламе // *Растения и промышленная среда*. Свердловск, 1970. С. 180–189.
20. Чайкина Г. М., Обьедкова В. А. Рекультивация нарушенных земель в горнорудных районах Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 266 с.

Поступила в редакцию 08.09.2014 г.

## MYCORRHIZA'S FORMATION OF HERBACEOUS SPECIES IN TECHNOGENIC EDAPHOTOPS

© N. V. Lukina, T. S. Chibrik\*, E. I. Filimonova, M. A. Glazyrina

*Ural Federal University n. a. B. N. Yeltsin  
19 Mira St., 620002 Ekaterinburg, Russia.*

*Phone: +7 (343) 261 74 95.*

*\*Email: tamara.chibrik@urfu.ru*

Currently, in term of human activity in the industrial regions, technogenic geochemical anomalies are formed. They are a source of environmental pollution by heavy metals. Phytoremediation – one of the most effective methods of cleaning of soils from heavy metals by plants which can accumulate them in their above-ground parts. It is well known that an important role in this process is played by arbuscular mycorrhiza, which reduces the toxic effects of metals. This mechanism is based on binding of metals on the surface of the hyphae. There are a lot of conflicting data about accumulation of heavy metals by plants. The functioning of the symbiosis in heavy metals pollution is not sufficiently studied. The aim of our research was to study the peculiarities of mycorrhiza formation in plant communities on industrial dumps in terms of metal contaminants. To study of mycorrhiza in plant communities on industrial dumps, we selected roots of herbaceous plants (N = 10), which were staining with aniline blue. The results of the mycorrhiza study in industrial dumps substrate with a high content of heavy metals and low nutrient content are given in the article. It was shown, that the majority of herbaceous species in the industrial dumps has arbuscular mycorrhiza. The roots contain a small amount of hyphae. It was found that the phosphorus accumulated in the aboveground phytomass, and the metals – in plant roots.

**Keywords:** *phytoremediation, arbuscular mycorrhiza, industrial dumps, heavy metals.*

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at [bulletin\\_bsu@mail.ru](mailto:bulletin_bsu@mail.ru) if you need translation of the article.

## REFERENCES

1. Killham K., Firestone M. K. *Plant and Soil*. 1983. Vol. 72. Pp. 39–48.
2. Weissenhorn I., Leyval C., Belgy G., Berthelin J. *Micorrhiza*. 1995. Vol. 5. Pp. 245–251.
3. Joner E. J., Leyval C. *Biology and Fertility of Soils*. 2001. Vol. 33. Pp. 351–357.
4. Andrade S. A. L., Abreu C. A., Silveira A. P. D. *Applied Soil Ecology*. 2004. Vol. 26. Pp. 945–954.
5. Janouskova M., Pavlikova D., Macek T., Vosatka M. *Plant and Soil*. 2005. Vol. 272. Pp. 29–40.
6. Rufyikiri G., Huysmans L., Wannijn J., Van Hees M., Leyval C., Jakobsen I. *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 130. Pp. 427–436.
7. Chen B. D., Borggaard O. K., Zhu Y. G., Jakobsen I. *New Phytologist*. 2005. Vol. 165. Pp. 591–598.
8. Turnau K., Kottke I., Oberwinkler F. *New Phytologist*. 1993. Vol. 123. Pp. 313–324.
9. Joner E. J., Briones R., Leyval C. *Plant and Soil*. 2000. Vol. 226. Pp. 227–234.
10. Citterio S., Santagostino A., Fumagalli P., Prato N., Ranalli P., Sgorbati S. *Plant and Soil*. 2003. Vol. 256. Pp. 243–252.
11. Christie P., Li X. L., Chen B. D. *Plant and Soil*. 2004. Vol. 261. Pp. 209–217.
12. Selivanov I. A. *Mikosimbioz, kak forma konsortivnykh svyazei v rastitel'nom pokrove Sovet-skogo Soyuz* [Microsymbiotrophy as a Form of Consorting Relations of Vegetation of the Soviet Union]. Moscow: Nauka, 1981.
13. Karatygin I. V. *Koevolutsiya gribov i rastenii* [Co-evolution of Fungi and Plants]. Saint Petersburg: Nauka, 1993.
14. Brandrett M. C. *Biol. Rev.* 2004. Vol. 79. Pp. 473–495.
15. Booth M. G. *Ecol. Letters*. 2004. Vol. 7. Pp. 538–546.
16. Read D. J., Leake J. R., Pevez-Moreno J. *Can. J. Bot.* 2004. Vol. 82. Pp. 1243–1263.
17. Chibrik T. S., Lukina N. V., Filimonova E. I., Glazyrina M. A. *Ekologicheskie osnovy i opyt biologicheskoi rekul'tivatsii narushennykh promyshlennost'yu zemel'* [Ecological Basis and Experience of Biological Recultivation of Lands Disturbed by Industry]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2011.
18. Provorov N. A., Vorob'ev N. I. *Geneticheskie osnovy evolyutsii rastitel'no-mikrobnogo simbioza* [Genetic Basis of Evolution of Plant-Microbe Symbiosis]. Saint Petersburg: Inform-Navigator, 2012.
19. Drobiz F. D., Mel'nikova E. I., Shilova I. I. *Rasteniya i promyshlennaya sreda*. Sverdlovsk, 1970. Pp. 180–189.
20. Chaikina G. M., Ob'edkova V. A. *Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' v gornorudnykh raionakh Urala* [Recultivation of Disturbed Lands in the Mining Regions of the Urals]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003.

*Received 08.09.2014.*