

О.В. Сыщикова, Н.Д. Сыщиков

## ВЛИЯНИЕ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ЭДАФОТОПОВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СООБЩЕСТВ ПОЧВЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ, ПРИНИМАЮЩИХ УЧАСТИЕ В ТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий государственный медицинский университет имени М. Горького» Министерства здравоохранения Российской Федерации*

Проведение горнотехнической рекультивации техноземов способствует восстановлению численного состава сообщества почвенных микроорганизмов, которые принимают участие в процессах трансформации соединений азота. Свидетельством этого является восстановление численности органотрофных бактерий цикла азота до 0,3 млн КОЕ/г почвы и увеличение в 2–3 раза количества стрептомицетов в поверхностных слоях. Возрастающие показатели микробиологической трансформации и минерализации органических соединений в техноземах подтверждают восстановление их биогенности при проведении рекультивации, что способствует интенсификации минерализационных процессов и усвоению растениями соединений азота в почве.

**Ключевые слова:** микроорганизмы, соединения азота, техноземы, горнотехническая рекультивация

**Цитирование:** Сыщикова О.В., Сыщиков Н.Д. Влияние рекультивации техногенных эдафотопов на функционирование сообществ почвенных микроорганизмов, принимающих участие в трансформации соединений азота // Промышленная ботаника. 2024. Вып. 24, № 3. С. 55–61. DOI: 10.5281/zenodo.14112643

### Введение

Совокупность имеющихся в настоящее время данных свидетельствует о том, что высокая концентрация микроорганизмов в почвах существенно влияет на процессы трансформации большинства химических элементов в биосфере, в результате чего изменения свойств почвы практически сразу отображаются на состоянии биосферы в целом. Рациональное использование экосистем техногенных ландшафтов является основой экологически сбалансированного развития индустриальных регионов.

Значительная часть нарушенных земель должна быть рекультивирована с целью дальнейшего использования в народном хозяйстве, например, в виде природных кормовых

угодий, рекреационных зон, либо войти в состав особо охраняемых природных территорий [6, 7].

Среди природных химических соединений наиболее важными для почвообразования являются органические вещества, которые активно влияют на формирование профиля почвы, создают оптимальные для биоты водно-физические, физико-химические условия и почвенно-экологический режим.

Микробиологическая составляющая почвы является необходимым фактором в процессах трансформации многих химических элементов, в том числе биогенного азота. Микроорганизмы значительно усложнили и изменили цикл

азота. Для понимания происходящих в почве процессов и обеспечения восстановления плодородия нарушенных почв необходимо изучать и учитывать особенности протекания в них микробиологических процессов, в частности, трансформации азота, и состав сообществ микроорганизмов, которые принимают участие в этом процессе [8].

В настоящее время достаточно очевидным является решение не только глобальных, но и большинства региональных экологических проблем с учетом деятельности почвенных микроорганизмов. Поэтому не вызывает сомнений актуальность исследований реакции микробных сообществ, которые принимают участие в трансформации соединений азота при рекультивации техноземов, и разработки теоретических основ устойчивости микробных ассоциаций к техногенной нагрузке.

#### **Цель и задачи исследований**

Целью настоящих исследований было изучение влияния различных вариантов технической рекультивации на функционирование микробных сообществ, принимающих участие в процессах трансформации азота. В задачи исследований входило изучение численности аммонификаторов и бактерий, усваивающих минеральные формы азота.

#### **Объекты и методики исследований**

Исследования проводили в весенний период на опытном поле Днепропетровского филиала института «Укрземпроект», представляющего собой земли в пониженных элементах рельефа, прилегающие к ограничивающей дамбе шламохранилища Северного горно-обогатительного комбината (г. Кривой Рог). Для изучения рациональных приемов и способов сельскохозяйственной рекультивации шламохранилища были созданы различные варианты технической рекультивации, которые имели следующую конструкцию:

- 1) шлам (технозем) без покрытия плодородным слоем почвы;
- 2) технозем, покрытый 30 см плодородного слоя чернозема обыкновенного;

3) технозем, покрытый 50 см лессовидного суглинка, на который уложено 30 см плодородного слоя чернозема обыкновенного;

4) технозем, покрытый 50 см лессовидного суглинка, на который уложено 50 см плодородного слоя чернозема обыкновенного;

5) чернозем обыкновенный [1].

Отбор почвенных образцов проводили по общепринятым методам с глубин – 0–10, 10–20, 20–30, 60–70 и 110–120 см [3]. В почвенных образцах определяли численность основных групп микроорганизмов, которые принимают участие в трансформации органических соединений азота (органотрофы) – на мясо-пептонном агаре (МПА) и микроорганизмов, которые расщепляют минеральные соединения азота и актиномицетов – на крахмало-аммиачном агаре (КАА). Интенсивность некоторых микробиологических процессов трансформации азота оценивали по показателю минерализации, который рассчитывается по соотношению количества микроорганизмов, использующих минеральный и органический азот (КАА/МПА) и показателя микробиологической трансформации органического вещества почвы, который рассчитывается по соотношению суммарной численности микроорганизмов на МПА и КАА и показателя минерализации [4]. Подсчет колоний проводили на 7–10 сутки исследования [5].

#### **Результаты исследований и их обсуждение**

Процессам микробиологической аммонификации подлежат белки, пептоны, пептиды, нуклеиновые кислоты, мочевины, гумус, хитин и т.д. Способность к аммонификации присуща большинству почвенных микроорганизмов – бактериям, грибам, актиномицетам. В процессе их жизнедеятельности образуются аммиак и органические кислоты.

При исследовании процессов аммонификации в поверхностном слое чернозема обыкновенного установлено, что количество органотрофных бактерий цикла азота составляет 2,22 млн КОЕ/г почвы. При прохождении вниз по почвенному профилю показано уменьшение численности микроорганизмов в среднем на 0,4 млн КОЕ/г почвы, что, скорее всего, связа-

но со снижением влажности и температурного режима почвы. Следует отметить, что в почвенных образцах чернозема обыкновенного отмечен достаточно высокий уровень микробиологической трансформации органических ве-

ществ, показатель составил 11,1–7,3. Высокий уровень микробиологических процессов может свидетельствовать об усилении функций саморегулирования экосистемы.

**Таблица 1.** Количество аммонификаторов (МПА) в техноземах и черноземе обыкновенном (млн КОЕ/г почвы)

Слой почвы, см	M±m	V, %	% к контролю	Tst	ПМТ
Технозем					
0–10	0,13±0,03	23,4	21,7	21,6	0,55
10–20	0,15±0,03	26,2	13,5	6,9	0,44
20–30	0,25±0,04	19,0	31,5	6,1	0,82
60–70	0,28±0,02	9,4	27,6	7,0	0,8
Технозем, покрытый 30 см плодородного слоя чернозема обыкновенного					
0–10	0,34±0,03	21,8	21,8	22,1	0,50
10–20	0,33±0,03	21,2	17,8	6,6	0,65
20–30	0,30±0,004	3,2	20,9	7,3	0,88
60–70	0,16±0,02	27,3	7,7	9,0	0,29
Технозем, покрытый 50 см лессовидного суглинка и 30 см плодородного слоя чернозема обыкновенного					
0–10	0,34±0,04	24,4	22,1	21,0	0,46
10–20	0,23±0,01	23,7	10,3	7,2	0,28
20–30	0,22±0,02	27,3	12,0	8,0	0,32
60–70	0,18±0,02	14,6	7,9	9,0	0,28
110–120	0,14±0,009	15,2	6,1	10,6	0,29
Технозем, покрытый 50 см лессовидного суглинка и 50 см плодородного слоя чернозема обыкновенного					
0–10	0,25±0,02	18,1	16,0	27,0	0,32
10–20	0,18±0,02	21,1	9,9	7,2	0,25
20–30	0,17±0,01	14,2	12,0	8,1	0,27
60–70	0,10±0,008	18,1	4,8	9,3	0,19
110–120	0,11±0,02	16,1	5,1	10,7	0,24
Чернозем обыкновенный					
0–10	2,22±0,22	19,8	–	–	11,1
10–20	2,11±0,2	27,8	–	–	7,32
20–30	1,86±0,23	24,3	–	–	2,88
60–70	1,54±0,04	23,0	–	–	3,33
110–120	1,44±0,16	6,3	–	–	2,15

**Примечание.** M – среднее значение признака, m – ошибка среднего, V – коэффициент вариации, % – процент превышения значений по отношению к аналогичным почвенным горизонтам чернозема обыкновенного, ПМТ – показатель микробиологической трансформации органического вещества, Tst – значения критерия Стьюдента.

Одним из условий равновесия экосистемы является взаимосвязь активности присущих ей микроорганизмов с их ценотическим биообразом. Исследование численности аммонификаторов в образцах технозема свидетельствует о снижении их числа в 17 и 14 раз в слоях 0–10 и 10–20 см в сравнении с черноземом обыкновенным. Аналогичные данные получены J. Long с соавторами [12], которыми установлено уменьшение количества аммонификаторов и актиномицетов на 68,4–80,3 % в почвах рекультивированных участков по добыче меди. В отличие от природных почв, в техноземах отмечено возрастание количества бактерий в среднем на 0,1 млн КОЕ/г почвы в более глубоких слоях.

Проведенный анализ данных свидетельствует о восстановлении биогенности нарушенных почв при проведении технической рекультивации. Так, в образцах почвы при нанесении 30 см плодородного слоя чернозема количество

органотрофов возросло в 2–3 раза в сравнении с техноземом без рекультивации, однако все-таки в 6 раз меньше, чем в черноземе. Полученные результаты подтверждаются и низкими (0,3–0,9) значениями показателя микробиологической трансформации органического вещества (табл. 1).

Нанесение на технозем 50 см лесса и 30 или 50 см плодородного слоя чернозема обыкновенного приводит к восстановлению численности органотрофов, превышающему их количество на участке без рекультивации в 2 раза.

В почве достаточно широко представлена группа микроорганизмов, которые трансформируют и минеральные формы азота [9]. Трансформация сложных полимеров – лигнина, хитина, ксилана, целлюлозы, гумусовых соединений происходит благодаря жизнедеятельности почвенных бактерий и мицелиальных прокариот (актиномицетов) [10, 11].

**Таблица 2.** Количество бактерий, трансформирующих минеральный азот (КАА) в техноземах и черноземе обыкновенном (млн КОЕ/г почвы)

Слой почвы, см	M±m	V, %	% к контролю	Tst	KM
Технозем					
0–10	0,23±0,06	25,8	13,5	22,6	0,58
10–20	0,13±0,02	12,1	14,2	7,5	0,32
20–30	0,16±0,06	23,8	39,0	4,9	0,24
60–70	0,10±0,06	16,3	23,9	0,4	0,38
Технозем, покрытый 30 см плодородного слоя чернозема обыкновенного					
0–10	0,69±0,04	14,1	17,7	22,4	2,05
10–20	0,34±0,03	17,5	14,7	7,5	0,97
20–30	0,27±0,02	24,1	12,0	7,4	0,57
60–70	0,24±0,01	11,8	28,2	5,0	1,48
Технозем, покрытый 50 см лессовидного суглинка и 30 см плодородного слоя чернозема обыкновенного					
0–10	0,97±0,03	7,5	24,8	21,0	2,85
10–20	0,39±0,02	10,7	16,7	7,3	2,04
20–30	0,30±0,01	15,3	13,9	7,3	1,07
60–70	0,25±0,02	21,8	29,8	4,9	1,52
110–120	0,12±0,01	27,2	21,8	5,2	0,89
Технозем, покрытый 50 см лессовидного суглинка и 50 см плодородного слоя чернозема обыкновенного					
0–10	0,81±0,03	9,5	20,9	22,0	3,30
10–20	0,51±0,03	11,5	21,9	6,8	2,78
20–30	0,32±0,02	13,6	22,4	6,5	1,86

60–70	0,13±0,02	28,7	15,6	5,9	1,31
110–120	0,10±0,01	27,4	18,2	5,5	0,79
Чернозем обыкновенный					
0–10	3,89±0,14	7,8	–	–	2,53
10–20	2,33±0,27	25,4	–	–	1,26
20–30	1,40±0,17	26,4	–	–	1,00
60–70	0,92±0,10	24,7	–	–	0,44
110–120	0,60±0,07	24,5	–	–	0,27

**Примечание.** М – среднее значение признака, m – ошибка среднего, V – коэффициент вариации, % – процент превышения значений по отношению к аналогичным почвенным горизонтам чернозема обыкновенного, КМ – коэффициент минерализации, Tst – значения критерия Стьюдента.

Полученные результаты изучения количественного состава амилитических микроорганизмов в черноземе обыкновенном позволяют утверждать, что в поверхностных слоях (0–10 и 10–20 см) численность бактерий составляла 3,89 и 2,33 млн КОЕ/г почвы соответственно. При прохождении вниз по почвенному профилю их количество уменьшается на 2,5–3 млн КОЕ/г почвы. Интенсивность процессов минерализации достаточно высокая, о чем свидетельствует коэффициент минерализации – от 0,27 до 2,53 (табл. 2).

В отличие от чернозема обыкновенного, в техноземах численность амилитических микроорганизмов составляет только 0,23 и 0,13 млн КОЕ/г почвы в слоях 0–10 и 10–20 см, что в 17–18 раз меньше, чем в природной почве. Полученные результаты подтверждаются низкими значениями коэффициента минерализации – 0,24–0,58 (табл. 2).

При нанесении 30 см плодородного слоя чернозема количество амилитических бактерий возрастает в 3 раза в поверхностных слоях рекультивированного технозема. В ходе исследований показано, что наилучшие условия для развития микробиоты формируются в техноземах с нанесением 50 см лесса и 30 см плодородного слоя, о чем свидетельствует увеличение количества бактерий в 3–4 раза в поверхностных слоях и в 1,3–1,6 раза в лессовидном суглинке. Коэффициент минерализации составляет 2,85–0,89. Таким образом, восстановление техноземов с использованием технической ре-

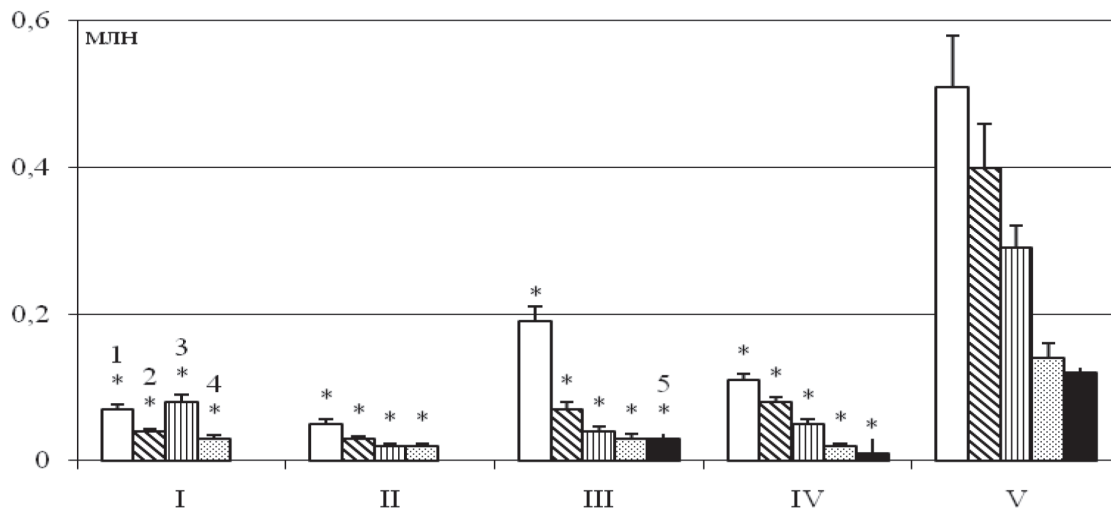
культивации обеспечивает увеличение в 3 раза численности амилитических микроорганизмов в сравнении с техноземом без рекультивации.

Закономерность распространения этих бактерий в почве в большинстве случаев связана с численностью представителей рода *Streptomyces* Waksman et Henrici по отношению к общему числу бактерий. Стрептомицеты способны более успешно в сравнении с другими бактериями осваивать почвенный профиль, преодолевая зоны, в которых отсутствуют питательные вещества [2].

Нашими исследованиями показано, что в составе сообщества микроорганизмов, которые трансформируют минеральные формы азота, большая роль принадлежит группе актиномицетов. Это дает основания считать, что в почве формируются наиболее оптимальные условия для интенсификации процессов трансформации азота, а именно активного расщепления белков и полипептидов, минерализации азотистых органических соединений. При исследовании количества актиномицетов рода *Streptomyces* показано, что в техноземе их максимальная численность наблюдалась в образцах с нанесением 50 см лесса и 30 или 50 см плодородного слоя чернозема (рисунок).

### Выводы

При проведении технической рекультивации техногенно-нарушенных почв лессом и плодородным слоем в 30 или 50 см черно-



**Рисунок.** Количество стрептомицетов (млн КОЕ/г почвы) в технозомах и черноземе обыкновенном, I – технозем, II – технозем + 30 см плодородного слоя чернозема, III – технозем + 50 см лесса + 30 см плодородного слоя, IV – технозем + 50 см лесса + 50 см плодородного слоя, V – чернозем обыкновенный, 1 – глубина отбора проб 0–10 см, 2 – 10–20 см, 3 – 20–30 см, 4 – 60–70 см, 5 – 110–120 см, \* – различия статистически достоверны относительно контроля при  $p < 0,05$

**Figure.** Number of streptomycetes (mln. CFU/g of soil) in technozems and chernozem usual, I – technozem, II – technozem + 30 cm of fertile layer of chernozem, III – technozem + 50 cm loess + 30 cm fertile layer, IV – technozem + 50 cm loess + 50 cm fertile layer, V – chernozem usual, 1 – sampling depth 0–10 cm, 2 – 10–20 cm, 3 – 20–30 cm, 4 – 60–70 cm, 5 – 110–120 cm, \* – the differences are statistically significant relative to the control at  $p < 0.05$

зема обыкновенного зафиксировано улучшение эдафических условий для функционирования почвенной микробиоты, которая принимает участие в трансформации соединений азота. О прохождении этих процессов в почве свидетельствует восстановление численности органоотрофов цикла азота до 0,3 млн КОЕ/г почвы и увеличение в 2–3 раза количества стрептомицетов в поверхностных слоях техноземов. Возрастающие показатели микробиологической трансформации и минерализации органических соединений в техногенно-нарушенных почвах также подтверждают восстановление биогенности техноземов при проведении технической рекультивации, что и приводит к интенсификации процессов минерализации и усвоения азотистых соединений в почве.

1. *Забалуев В.А.* Формирование агроэкосистем рекультивированных земель в степи Украины: эдафическое обоснование. К., 2010. 261 с.
2. *Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М.* Экология актиномицетов. М.: ГЕОС, 2001. 256 с.

3. *Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева.* М.: Изд-во МГУ, 1980. 213 с.
4. *Мірошніченко М.М., Маклюк О.І., Чабанова В.В., Мельничук А.О., Чабан В.І.* Вплив систем удобрення на мікробіологічні процеси трансформації азоту за різних ґрунтово-кліматичних умов // *Агрохімія і ґрунтознавство.* 2012. Вип. 77. С. 24–27.
5. *Руководство к практическим занятиям по микробиологии / под ред. Н.С. Егорова.* М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
6. *Созина И.Д., Данилов А.С.* Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // *Записки Горного института.* 2023. Т. 260. С. 297–312.
7. *Фасхутдинова Е.Р., Осинцева М.А., Неворова О.А.* Перспективы использования почвенного микробиома горных выработок для рекультивации антропогенно нарушенных экосистем // *Техника и технология пищевых производств.* 2021. Т. 51, N 4. С. 883–904.

8. Чебанова В.В. Вплив різних систем удобрення на мікробіологічні процеси трансформації азоту в чорноземі типовому на початку та наприкінці вегетації // *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2011. Вип. 74. С. 119–122.
9. Balows A., Truper H.G., Dworkin M. *The Procarvates. A handbook on the biology of bacteria. Ecophysiology, isolation, identification, application*. Berlin: Springer-Verlag, 1991. P. 921–1157.
10. Jendrosser D., Tomasi G., Kroppenstedt R.M. Bacterial degradation of natural rubber: a privilege of actinomycetes // *FEMS Microbiology Letters*. 1997. Vol. 150, N 2. P. 179–188.
11. Ledin M., Krantz-Rulcker C., Allard B. Microorganisms as metal sorbents: comparison with other soil constituents in multi-compartment systems // *Soil Biology & Biochemistry*. 1999. Vol. 31, N 12. P. 1639–1648.
12. Long J., Huang Ch., Ten Y., Yao H. Microbial eco-characteristics of reclaimed mining wasteland in red soil area of southern China. I. Effects on soil microbial activity // *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2003. Vol. 14, N 11. P. 1925–1928.

Поступила в редакцию: 01.08.2023

UDC 631.461:579.873

## IMPACT OF TECHNOGENIC EDAPHOTOPES RECULTIVATION ON THE FUNCTIONING OF SOIL MICROORGANISM COMMUNITIES INVOLVED IN THE TRANSFORMATION OF NITROGEN COMPOUNDS

O.V. Syshchykova, N.D. Syshchykov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «M. Gorky Donetsk State Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation*

The mining and technical reclamation of technozems contributes to the restoration of the numerical composition of the community of soil microorganisms that take part in the processes of nitrogen compounds transformation. This is evidenced by the restoration of the number of organotrophic bacteria of the nitrogen cycle to 0.3 million CFU/g of soil and a 2–3 times increase in the number of streptomycetes in the surface layers. The increasing indicators of microbiological transformation and mineralization of organic compounds in technozems confirm the restoration of their biogenicity during reclamation, which contributes to the intensification of mineralization processes and the absorption of nitrogen compounds by plants in the soil.

**Key words:** microorganisms, nitrogen compounds, technozems, mining and technical reclamation

---

**Citation:** Syshchykova O.V., Syshchykov N.D. Impact of technogenic edaphotopes reclamation on the functioning of soil microorganism communities involved in the transformation of nitrogen compounds // *Industrial Botany*. 2024. Vol. 24, N 3. P. 55–61. DOI: /zenodo.14112643

---