

## Эколого-физиологическое разнообразие микробных сообществ в техногенно-нарушенных ландшафтах Кузбасса

В. С. АРТАМОНОВА, В. А. АНДРОХАНОВ, Д. А. СОКОЛОВ, И. В. ЛЮТЫХ,  
В. В. БУЛГАКОВА, С. Б. БОРТНИКОВА\*, А. С. ВОДОЛЕЕВ\*\*

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630099, Новосибирск, ул. Советская, 18  
E-mail: artamonova@issa.nsc.ru*

*\*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3*

*\*\*Кузбасская государственная педагогическая академия  
654027, Новокузнецк, просп. Пионерский, 13*

### АННОТАЦИЯ

Приводятся сведения о жизнеспособном пуле микроорганизмов, регистрируемых в поверхностном слое техногенных почв, формирующихся на угольных отвалах, золошлаках и отходах переработки руд. Вскрыты экофизиологические особенности сообществ олиготрофных бактерий, выявлены мелко-колониальные формы и биопленки прокариот, показано влияние рекультивации и почвоулучшителей на состав основных групп микроорганизмов.

**Ключевые слова:** нарушенные промышленные территории, складированные отходы, рекультивация, почвоулучшители, тяжелые металлы, озеленение, микроорганизмы, Кузбасс.

В районах добычи и переработки угля, нефти, газа, железных руд и руд цветных металлов сформировались компактные территориально-отраслевые системы городов с напряженной экологической обстановкой. Они встречаются в Кузбассе, Мосбассе, Поволжье, Западной Сибири, на Таймыре, Коль-

ском п-ове, Дальнем Востоке, в районе Кавказских Минеральных Вод. Система включает малые города (до 50 тыс. жителей), средние (50–100 тыс.), большие (100–250 тыс.), крупные (500 – 1 млн) с центрами, не всегда наделенными административными полномочиями высокого уровня, но уверенно проявляющими себя региональными или субрегиональными лидерами, в том числе Новокузнецк – центр Южного Кузбасса. В самом городе и его окрестностях развита добыча коксующихся и энергетических углей, на которой основаны коксохимия и теплоэнергетика. Вместе с черной и цветной металлургией

---

Артамонова Валентина Сергеевна  
Андроханов Владимир Алексеевич  
Соколов Денис Александрович  
Лютых Ирина Владимировна  
Булгакова Виктория Викторовна  
Бортникова Светлана Борисовна  
Водолеев Анатолий Сергеевич

они составляют ядро промышленного комплекса, вокруг которого в последние 50 лет активно развиваются химическая промышленность, машиностроение, производство металлоконструкций, а также отрасли, обслуживающие население, сконцентрированное преимущественно в городе.

Вокруг Новокузнецка на значительной территории сформировались техногенные ландшафты с техногенными пустынями, которые в настоящее время находятся в непосредственной близости с новостройками. Плодородные почвы при этом оказались разрушенными и погребенными под промышленными отвалами, строительным мусором, отходами частного сектора. Общая площадь нарушенных открытыми разработками земель в Кузбассе превышает 100 тыс. га. Сохранившаяся часть почв постоянно загрязняется осадками аэрогенных выбросов градообразующих предприятий и транспорта, так как город находится среди экологически неблагоприятных лидеров.

Острый дефицит плодородных почв возник вследствие мощного наводнения в 1958 г. Тогда обводненные территории в основном засыпались 2-метровой толщей техногенного грунта.

Вовлечение нарушенных земель в биологическую рекультивацию с целью формирования ценных свойств и режимов в техногенных почвах не снизило остроты проблемы – почвообразование происходит чрезвычайно медленно. По этой причине в последнее десятилетие резко возрос интерес к инновационным технологиям ускоренного восстановления нарушенных почв с использованием растительно-бактериальных технологий, почвоулучшителей: торфа, сапропелей, осадков сточных вод (ОСВ) [1]. Почвоулучшающий эффект использования ОСВ при рекультивации нарушенных земель теоретически ожидаем, но на практике не всегда убедителен [1, 2]. Поведение микроорганизмов в такой обстановке не исследовано. Можно предположить, что на запас основных физиологических групп микроорганизмов, которые участвуют в обеспечении растений доступным минеральным питанием, позитивно повлияет энерготрофический ресурс, внесенный с ОСВ. Он может оказаться важным источником белкового и минерального азота, чрез-

вычайно дефицитного в техногенных почвах. Под термином “техногенные почвы” мы понимаем такие “тела”, которые воссоздаются в техногенном ландшафте без почвенного профиля в генетическом докучаевском смысле, но по ходу взаимодействия с окружающей средой приобретают специфические различия в преобразованной толще, обязанные своему исходному генезису, способам рекультивации, мелиорации и самопоселенцам.

К настоящему времени в большей степени изучены процессы эволюции биогеоценозов на угольных отвалах. Показано, что на инициальной стадии освоения вскрышных пород, как и обнаженных скал, важное значение имеют слизистые одноклеточные и нитчатые формы фото- и гетеротрофных микроорганизмов [3–9], которые выживают благодаря прижизненным метаболитам (органическим кислотам, внеклеточным ферментам, пигментам, полисахаридам) и жизненно важным катионам, притягиваемым на поверхность клеток из окружающей среды (вследствие отрицательного заряда клеток). Диазо- и олиготрофные цианобактерии, а также микрофлора рассеяния (грибы и олигонитрофильные бактерии) начинают восстановительную сукцессию на угольных отвалах Кузбасса [6, 9]. Цианобактериальные прокариоты обнаруживают проявление гетерогенности популяций (колоний): наряду с диффузным ростом формируются пятна “цветения”, “войлок”, биопленки с концентрацией клеток (до  $10^9$  в  $\text{см}^{-3}$ ), обеспечивающей, во-первых, повышение устойчивости, гибкости, приспособленности популяции прокариот к изменению внешних условий [10], во-вторых – активное разрушение минералов и высвобождение питательных элементов [11], в-третьих – микробную иммобилизацию легкоподвижного азота. Это способствует формированию начальных звеньев трофической цепочки и образованию микробо-растительных ассоциаций на самозарастающих угольных отвалах молодого возраста [6, 12].

Однако разнообразие физиологических групп микроорганизмов по местообитанию и используемым субстратам в техногенных почвах другого генезиса – на золошлаках и рудных отходах – ранее не исследовалось.

Цель работы – частичное восполнение этого пробела и выявление жизнеспособной

микробиоты в посттехногенную фазу развития на угольных отвалах, золо- и рудных шлаках. В задачи исследований входило определение физико-химических характеристик поверхности заселяемых техногенных субстратов различного генезиса, эколого-трофического и таксономического разнообразия микробных поселенцев, регистрация микробиоты колонизированных цианобактериальных сообществ – биопленок. Проанализированы содержание жизнеспособных психро-, мезо- и термофильных микроорганизмов, поскольку угольные отвалы периодически “горят”, а поверхность шламов подвержена существенным перепадам температур. Обследованы также рекультивированные почвы и экспериментальные участки с саженцами и посевами растений, в корневую зону которых внесли почвоулучшители.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследовали микробные сообщества, сохраняющие жизнеспособность на многолетних шлаках хвостохранилища Абагурской аглофабрики, золоотвалах Томь-Усинской ГРЭС, отвалах Байдаевского угольного разреза, расположенных в лесостепной зоне, прилегающей к городской черте Новокузнецка.

Отходы Абагурской аглофабрики характеризуются высокой плотностью – от 1,7 г/см<sup>3</sup> и более, что делает субстрат практически непроницаемым для корней, резко снижает объем порового пространства, количество пор, ухудшая газовый обмен. Эти техногенные образования имеют представительный набор тяжелых металлов (ТМ), которые значительно превосходят кларковое содержание в зрелых почвах. Химический состав хвостов обогащения железных руд включает сульфиды железа, оксиды кремния, алюминия, железа, магния. Сульфиды железа окисляются до сульфатов и серной кислоты, которая нейтрализуется карбонатами до сульфатов, а сульфат железа в слабощелочной среде подвергается гидролизу. По этой причине сильное подкисление среды регистрируется редко. Вместе с тем в некоторых точках регистрируется повышенная радиация. Фитотоксичность шламов соответствует 4-му клас-

су токсичности. Органическое вещество и растительность отсутствуют. Полигон складированных хвостов рассматривается геохимиками как техногенная пустыня.

Золоотвалы Томь-Усинской ГРЭС менее токсичны для растений и более водопроницаемы, включают золошлаковый материал: фракции золы размером менее 0,25 мм и шлака – более крупных частиц, что остались от сжигания каменного угля. Естественная растительность осваивает такой субстрат медленно. На его поверхности развиваются мхи, лишайники, водоросли, единичные растения.

Отвалы угольных разработок Байдаевского разреза характеризуются повышенной почвообразующей ценностью из-за высокого содержания в них лессовидных, преимущественно карбонатных, суглинков. Мощность этих отложений достигает 15–20 м. Текстура их нечетко комковатая, пористая. В основных породах могут присутствовать глинистые массы. Глинистые частицы сливаются с зернышками кальцита (до 20–30 %) в виде неравномерной сыпи. Глинистая толща пропитана гидроксидами железа, органическими веществами, в состав которых входят гумус и фюзенированные растительные остатки [13]. Характерная для суглинков микроагрегированность, пористость, близкая к нейтральной реакция среды, насыщенность основаниями обуславливают их ценность при формировании молодых почв в качестве материнских пород.

Наряду с этим проявление гипергенных процессов (самовозгорания, окисления, гидратации в теле угольных отвалов) обеспечивает формирование экотопов с неустойчивыми режимами увлажнения, аэрации, теплообеспеченности, окислительно-восстановительной обстановки. Немаловажную роль в формировании фитотоксичности играет пиритная сера (до 727 мг/100 г грунта).

Для выявления жизнеспособной микробиоты и характеристики среды ее обитания отбор образцов осуществляли одновременно по всем объектам в посттехногенную фазу, после многолетнего естественного самозарастания либо рекультивации. Обследовали биогенность поверхностного и корнеобитаемого слоев техногенных экосистем, естественно зарастающих и рекультивируемых, а также

подверженных экспериментальному озеленению. Для этого использовали саженцы черного тополя и посевы многолетних трав (злаково-бобовая смесь), субстрат вермикулированных осадков сточных вод, обработанных препаратом “БакСиб”.

Экспериментальные площадки с тополем черным и многолетними травами закладывали по аналогии с ранее испытанными ОСВ [1]. Орошение бактериальным препаратом осуществлялось в соответствии с рекомендацией его изготовителей.

Под биогенностью мы рассматриваем в данной статье только присутствие жизнеспособного пула микроорганизмов.

Обследовали участки, подверженные лесной и сельскохозяйственной рекультивации, экспериментальному озеленению, пирогенному воздействию, а также естественно самозарастающие, рассматриваемые как контрольные.

При отборе применены металлические кольца разного диаметра и глубины с целью точного учета объема и массы взятой пробы, определения доли мелкозема, который после просеивания образца через сито диаметром 2 мм использовали для высева жизнеспособного пула (запаса) микроорганизмов.

Эта же часть мелкозема подвергалась традиционным и современным методам почвенного анализа. Определяли реакцию почвенного раствора водной и солевой суспензии (потенциометрически), общее содержание углерода (методом мокрого сжигания по Тюрину), содержание органического углерода, водорода и азота (на СНН-анализаторе PerkinElmer 2400 Series II), фракционный состав восстановленного углерода пород каменноугольных разрезов согласно патенту [14].

Изучение жизнеспособного запаса микроорганизмов проводили методом посева на плотные питательные среды и прямым микроскопированием. Использовали голодный агар, полуголодные и богатые питательные среды – содержащие минеральные формы азота, обогащенные сахарозой (по И. Е. Мишустинской), глюкозой (по Чапеку), крахмалом (крахмало-аммиачный агар – КАА). Целлюлозолитические микроорганизмы определяли по высеву на среду Гетчинсона. Трофическое разнообразие микроорганизмов

включало олигонитрофилов, потребителей минерального азота, утилизаторов моносахаров, целлюлозы. Таксономическое разнообразие основных физиологических групп базировалось на идентификации бактерий, в том числе актиномицетов, и грибов. Морфофизиологическое разнообразие бактерий идентифицировали с учетом выявления микроколоний (колониеобразующих единиц – КОЕ) и биопленок. Жизнеспособный пул мелких колоний учитывали при помощи лупы (увеличение  $\times 100$  и более) и ранжировали в группы по диаметру: менее 0,2 мм и более (0,2–0,4 мм). Микроорганизмы дифференцировали по отношению к температуре на психро-, мезо- и термофилы после экспозиции в термостате при  $T$  15, 30 и 60 °С. Культивирование микроорганизмов на среде Чапека проводилось на фоне кислых и щелочных значений рН питательной среды.

Содержание органического азота в сухом агаре не превышало по показаниям СНН-анализатора 0,15 %.

Химический состав цианобактериальных биопленок определяли на СНН-анализаторе PerkinElmer 2400 Series II, а также методом РФА – СИ для твердых проб на станции Института ядерной физики СО РАН.

Результаты исследований подвергнуты математической обработке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химическая обстановка, складывающаяся в среде обитания микроорганизмов, обуславливается широким диапазоном скелетности исходных пород (табл. 1), слабокислой и слабощелочной реакцией среды (5,64–7,08). Содержание углерода (по Тюрину, %) минимально в самозарастающих отвалах (1,92–6,72), несколько выше в рекультивируемых вариантах и максимально в местах проявления пирогенеза (8,24–11,21). Содержание С, Н, N крайне низкое в шламах полиметаллических руд (табл. 2). Здесь же преобладают трудно- и среднеокисляемые вещества. На полигоне угольных отвалов трудноокисляемые соединения преобладают под дерниной злаковых культур на участке, испытывающем воздействие сельскохозяйственной рекультивации, а также на пирогенном участке. Суммарный запас трудно- и

Т а б л и ц а 1  
Физико-химическая характеристика техногенных местобитаний микроорганизмов (слой 0–5 см)

Место отбора	Ориентировочный возраст, лет	Плотность твердой фазы, г/см <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Порозность, %	Содержание физической глины в мелкоземле			rH <sub>KCl</sub>	pH <sub>водн</sub>
					Каменистость, %	Каменистость, %	Каменистость, %		
Угольный отвал:									
техногенный контроль*	25–30	2,58	1,49	42,2	23,3	82,3	7,01	7,82	
лесная рекультивация	40	2,63	1,27	51,7	38,5	5,3	6,81	7,63	
с.-х. рекультивация	20	2,67	1,21	54,7	48,1	0	6,74	7,64	
Участки пирогенной зоны:									
1	25	2,65	1,34	49,4	31,2	62,1	6,98	7,46	
2	25–30	2,71	1,38	49,1	27,3	58,9	6,78	7,02	
3	30	2,70	1,23	54,4	35,4	3,6	6,22	7,25	
Золоотвал:									
техногенный контроль	5–10	–	1,52	–	13,2	87,6	5,64	6,32	
лесная рекультивация	30–40	–	1,49	–	34,9	0	6,18	7,07	
Рудный шлам:									
техногенный контроль	15–20	2,79	1,41	49,5	42,1	0	7,03	7,66	
лесная рекультивация	35	2,69	1,33	50,6	33,8	0	7,08	7,49	

Примечание: \* – производилась повторная отсыпка.

среднеокисляемых соединений преобладает во всех исследуемых вариантах. Это обусловлено накоплением медленно разлагающихся растительных и животных остатков, поступивших извне. Их состав включает лигнин хвои, хитин насекомых, кератин перьев птиц и шерсти животных, целлюлозу и гемицеллюлозу растений, гемицеллюлозу грибных гиф и другие компоненты. Легкоокисляемые соединения достигают максимальных величин только на угольном полигоне, независимо от рекультивации. Они обязаны присутствию низкомолекулярных органических веществ, одним из поставщиков которых является биомасса микроорганизмов, чрезвычайно быстро трансформируемая [15]. Здесь же выявлены и максимальные значения углерода, водорода и азота, что обусловлено отчасти прохождением лессовидными суглинками в былые эпохи фаз почвенного развития. До рекультивации участков в суглинках зафиксированы заметные количества углерода (0,2–0,9 %), фосфора (валовой – до 0,3 %, подвижный – от 2 до 50 мг-экв на 100 г субстрата), калия (валовой – 1,4–2,3 %, обменный – 6 мг-экв на 100 г субстрата), валового азота до 0,1 % [13].

Не случайно в условиях естественного самозаращения угольного отвала в посттехногенный период выявлена максимальная биогенность – заселенность микроорганизмами, не требовательными к белковому азоту (рис. 1). Пул мезофильных олиготрофных микроорганизмов, в том числе олигонитрофилов, экологически значим согласно условным критериям числа колоний, изложенным ранее [16]. Для бактерий – не менее 1 млн на 1 г субстрата хотя бы в какой-то сезон, а для грибов, дрожжей, водорослей – 10 тыс. на 1 г. В исследованных местообитаниях жизнеспособный пул бактерий и грибов складывается также из копио- и диссипотрофов.

Следует отметить, что биогенность всех обследованных техногенных почв обеспечивается как психро-, так и мезофилами, на пирогенном участке угольного отвала дополняется термофильными микромицетами, в экологически значимом количестве – 42 тыс. КОЕ/г. В почвах, формирующихся на субстратах с полиметаллическим составом (Абагурский шламоотвал и Томь-Усинский золо-

Т а б л и ц а 2

## Химические показатели техногенного субстрата, %

Место отбора	C <sub>орг</sub>	Доля фракции, от валового количества окисляемые соединения			Содержание элементов		
		трудно-	средне-	легко-	C <sub>общ</sub>	Н	N
<b>Угольный отвал:</b>							
техногенный контроль	2,28	5,3	58,7	36,1	14,19	1,76	0,72
лесная рекультивация	1,68	10,7	10,7	78,6	4,26	0,91	0,26
с.-х. рекультивация	2,88	62,5	14,7	22,8	3,34	0,78	0,22
<b>Участки пирогенной зоны:</b>							
1	8,24	44,6	37,9	17,5	17,75	1,82	0,83
2	17,29	36,5	58,9	4,6	17,22	1,83	0,98
3	11,21	57,9	31,3	10,7	14,18	1,54	0,65
<b>Золоотвал:</b>							
техногенный контроль	6,72	32,5	61,4	6,1	8,21	0,36	0,29
лесная рекультивация	9,91	18,5	61,4	20,1	15,73	0,4	0,52
<b>Рудный шлам:</b>							
техногенный контроль	1,92	30,3	52,5	17,2	1,93	0,37	0,12
лесная рекультивация	5,22	69,9	22,1	7,9	2,58	0,27	0,11

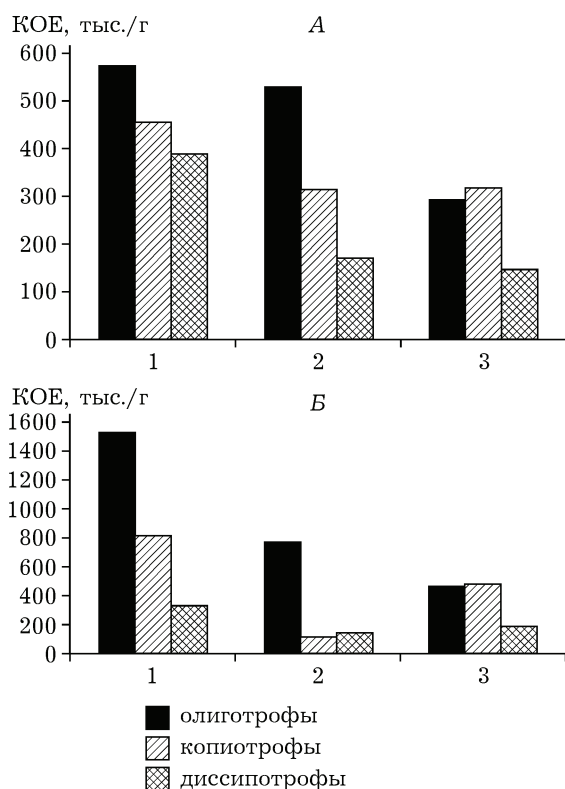


Рис. 1. Жизнеспособный пул микроорганизмов: А – психрофилов, Б – мезофилов.

Техногенный контроль: 1 – угольный отвал, 2 – золоотвал, 3 – рудный шлам

шлам), заселение микроорганизмами происходит медленнее. Вызывает определенный интерес и формирование цианобактериальных биопленок на поверхности техногенной почвы (Байдаевский угольный отвал) с содержанием в биомассе 39 % углерода, 8 % водорода и 4 % азота. Высокое отношение углерода к азоту отмечалось ранее на лесовидном суглинке 20-летнего самозараствания в районе КАТЭКа [11]. Анализ химического состава биопленок выявил высокую сорбцию ими биогенных элементов, тяжелых металлов и неметаллов (табл. 3).

Рекультивация отвалов разного происхождения и процессы пиролиза, протекающие на угольном отвале, усиливают заселенность техногенных почв психро- и мезофильными олиготрофными, в том числе диссипотрофными микроорганизмами (табл. 4). Существенно возрастает число копиотрофов – актинобактерий, иммобилизирующих минеральный азот, что также характерно для зрелых сообществ. На участках, подвергнутых лесной рекультивации, психрофильным актинобактериям принадлежит 1,3–5,2 % жизнеспособного запаса, под многолетними травами и на пирогенной территории их вклад больше: 3,1–8,4 %. В свою очередь мезофильные актинобактерии сла-

**Химический состав биопленок и мелкозема на поверхности техногенного субстрата, мг/кг  
(аналитик Ю. П. Колмогоров, ИГМ СО РАН)**

Химический элемент	Биопленка	Соскоб из-под пленки	Мелкозем под пленкой, слой 0–1 см
K, %	2,3	1,6	2,4
Ca, %	8,8	3,9	4,1
Mn, %	0,08	0,047	0,11
Fe, %	3,8	1,8	4,3
V	110	32	130
Cr	130	69	130
Ni	58	49	66
Cu	54	51	54
Zn	110	120	130
Y	34	12	34
Mo	1,0	0,77	1,3
As	14	7,9	11
I	10	2,0	10
Br	8,6	8,8	35
Cs	4,2	1,2	4,1
Pb	20	11	24
Th	9,9	3,0	8,8
U	3,3	0,9	3,8

гают 1,4–6,3 % жизнеспособного пула в условиях лесной рекультивации и 4,1–9,9 % – в остальных ситуациях. Интересно, что целлюлозолитические микроорганизмы в рекультивированных почвах также многочисленны. Содержание мезофильных целлюлозолитиков составляет 6,2–11,3 млн КОЕ/г (рис. 2). Рекультивация позитивно отражается на пуле психро- и мезофильных грибов (см. табл. 4 и рис. 3). Максимальное содержание как тех, так и других групп микромицетов (в экологически значимом количестве) обнаружено на рекультивируемом рудном полигоне – 148 тыс. КОЕ/г.

Следует подчеркнуть, что в рекультивированных почвах независимо от генезиса субстрата бактериальный пул складывается с участием микроколониальных олиготрофных форм – как психро-, так и мезофильных (табл. 5).

Использование вермикулированного ОСВ как почвоулучшителя способствует биогенности корнеобитаемого слоя растений во всех испытанных техногенных субстратах по сравнению с техногенной почвой без биодобавки (рис. 3). Повышается содержание основных групп микроорганизмов, что позитивно отражается на обеспеченности растений доступ-

ными минеральными элементами в широком диапазоне температур. Вместе с тем внесение препарата “БакСиб” не всегда усиливает заселенность вермикулированного субстрата микроорганизмами. Нейтральный эффект выявлен на золоотвале под саженцами тополя черного в отношении психро- и мезофильных микроорганизмов всех трофических групп (рис. 4). На рудном шламе под многолетними травами привнос препарата привел к увеличению числа олиготрофных бактерий (рис. 5). Грибная компонента подавлялась под действием “БакСиб” только на угольном отвале (рис. 6).

Следовательно, рекультивация и почвоулучшение с ОСВ активизируют биогенность техногенных почв. Имобилизация азота микроорганизмами обеспечивает частичное закрепление легкоподвижных форм, что особенно важно для саженцев тополя черного, который пытаются вернуть в исходный ассортимент озеленения. Такой путь соответствует принципу “превентивной охраны природы”.

Выявленный олиготрофный комплекс микроорганизмов соответствует посттехногенной фазе развития, когда в техногенной почве на угольном отвале сохраняется полилитогенетичность техногенных масс – присутствие

Жизнеспособный пул микроорганизмов разных экофизиологических групп, КОЕ/г

Место отбора	Олиготрофы по С и N			Копиотрофы			Олигонитрофилы			Диссипотрофы			
	общее число млн	V	%	общее число млн	V	%	из них акти- номицетов тыс.	общее число млн	V	%	Преимущественно бактерии, рН 7,2	V	Грибы, рН 5,4
<i>Психрофилы</i>													
Угольный отвал:													
лесная рекультивация	9,6 ± 0,3	5,9		29,5 ± 0,9	5,6		783,2	4,1 ± 0,4	*		1628,0 ± 94,4	10,0	14,7 ± 1,2
с-х. рекультивация	2,4 ± 0,1	10,8		21,9 ± 0,7	5,6		680,9	3,8 ± 0,5	*		255,5 ± 0,2	0,1	28,4 ± 7,1
Участки пирогенной зоны:													
1	7,1 ± 0,2	6,1		14,9 ± 0,5	5,8		759,2	2,4 ± 0,3	*		408,2 ± 31,1	13,2	95,2 ± 6,8
2	2,7 ± 0,2	14,8		27,9 ± 2,4	14,9		375,5	1,2 ± 0,2	*		455,8 ± 44,6	*	129,3 ± 6,8
3	8,6 ± 0,2	4,6		17,5 ± 1,0	9,8		1482,1	5,9 ± 0,6	*		1614,0 ± 42,7	4,6	147,4 ± 12,2
Золоотвал:													
лесная рекультивация	7,5 ± 0,2	4,5		24,2 ± 3,1	*		1258,4	4,9 ± 0,1	4,1		2891,3 ± 41,7	2,5	82,4 ± 15,0
Рудный шлам:													
лесная рекультивация	6,4 ± 0,2	6,5		8,1 ± 0,1	2,5		1050,0	1,7 ± 0,1	8,8		94,3 ± 6,7	12,3	148,1 ± 6,7
<i>Мезофилы</i>													
Угольный отвал:													
лесная рекультивация	6,1 ± 0,5	15,0		13,9 ± 2,8	*		530,5	2,5 ± 0,2	6,0		1207,0 ± 54,8	7,8	28,1 ± 7,0
с-х. рекультивация	6,3 ± 0,2	6,4		12,8 ± 0,3	3,5		536,2	2,9 ± 0,2	10,3		248,2 ± 14,2	9,8	17,0 ± 2,1
Участки пирогенной зоны:													
1	8,7 ± 0,1	2,9		11,2 ± 1,1	15,1		1110,2	1,4 ± 0,1	10,7		496,5 ± 67,0	*	47,6 ± 13,6
2	10,5 ± 0,3	5,8		14,3 ± 0,4	4,5		187,8	0,9 ± 0,1	11,1		523,8 ± 35,9	11,8	81,6 ± 20,4
3	8,9 ± 0,6	12,3		25,9 ± 0,7	4,5		2189,5	5,3 ± 0,6	*		2098,3 ± 25,3	2,1	94,7 ± 6,1
Золоотвал:													
лесная рекультивация	7,4 ± 0,5	12,8		20,0 ± 0,9	7,8		1258,4	3,4 ± 0,7	*		2374,5 ± 507,5	*	30,0 ± 7,5
Рудный шлам:													
лесная рекультивация	10,1 ± 0,2	4,0		7,6 ± 0,5	10,5		1050,0	1,6 ± 0,1	12,5		141,4 ± 11,6	14,2	148,1 ± 6,7

Примечание: \* – коэффициент вариации более 15 %.



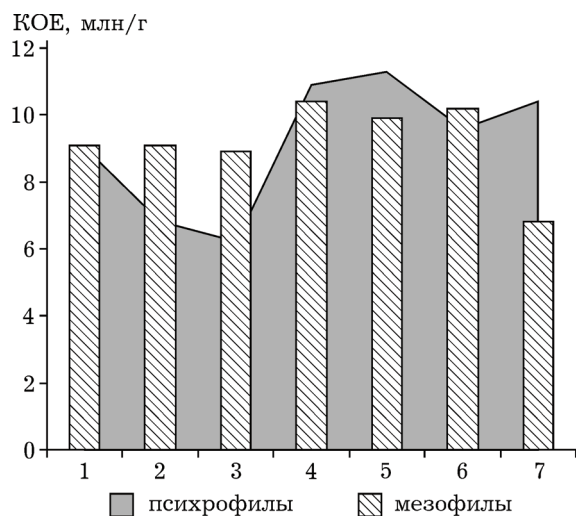


Рис. 2. Жизнеспособный пул целлюлозолитических микроорганизмов в рекультивированных почвах: 1 – угольный отвал, лесная рекультивация; 2 – угольный отвал, с.-х. рекультивация; 3–5 – пирогенные участки; 6 – золоотвал, лесная рекультивация; 7 – рудный шлам, лесная рекультивация

единовременно нескольких пород, а в почвах, формирующихся на промышленных шламах, встречается полиметаллическое и окислительно-восстановительное разнообразие. Экологическая стратегия микробной группировки направлена на выветривание пород и формирование элювия, песка и мелкозема в обстановке дефицита органического вещества в среде обитания. Не исключено, что мик-

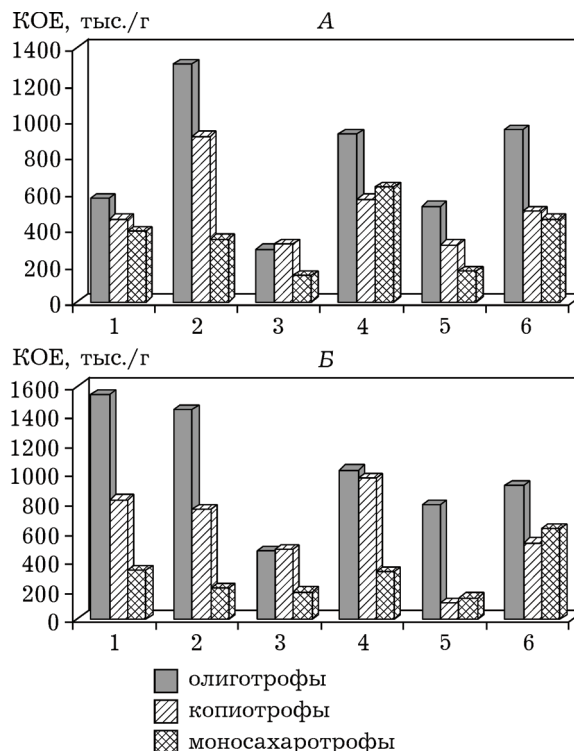


Рис. 3. Содержание основных физиологических групп микроорганизмов: А – психрофилов, Б – мезофилов в поверхностном слое техногенных субстратов. Угольный отвал: 1 – контроль, 2 – ОСВ; рудный шлам: 3 – техногенный, 4 – ОСВ; золоотвал: 5 – контроль, 6 – ОСВ

роорганизмы участвуют также в процессе бергинизации мелкозема – его постепенном освоении микробиотой, обогащении экзоте-

Т а б л и ц а 5

**Жизнеспособный пул микроколониальных олиготрофных бактериальных форм**

Место отбора	Общее число психрофильных бактерий, млн КОЕ/г	Колонии, d, мм		Общее число мезофильных бактерий, млн КОЕ/г	Колонии, d, мм	
		≤ 0,2	0,2–0,4		≤ 0,2	0,2–0,4
		%			%	
<b>Угольный отвал:</b>						
лесная рекультивация	9,6 ± 0,3	83,4	16,6	6,1 ± 0,5	90,3	9,7
с.-х. рекультивация	2,4 ± 0,1	59,1	40,9	6,3 ± 0,2	88,3	11,7
<b>Участки пирогенной зоны:</b>						
1	7,1 ± 0,2	81,7	18,3	8,7 ± 0,1	86,8	13,2
2	2,7 ± 0,2	76,4	23,6	10,5 ± 0,3	81,8	18,2
3	8,6 ± 0,2	33,7	66,3	8,9 ± 0,6	77,6	22,4
<b>Золоотвал:</b>						
лесная рекультивация	7,5 ± 0,2	61,8	38,2	7,4 ± 0,5	97,1	2,9
<b>Рудный шлам:</b>						
лесная рекультивация	6,4 ± 0,2	83,5	16,5	10,2 ± 0,2	95,9	4,1

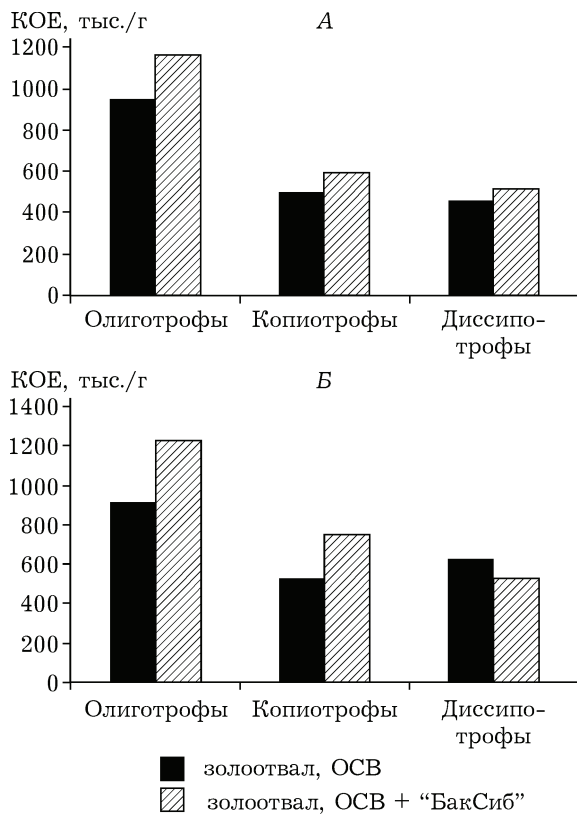


Рис. 4. Жизнеспособный пул микроорганизмов: А – психрофилов, Б – мезофилов в прикорневой зоне тополя черного

таболитами и содержащим микробных клеток [17]. Такая переработка мелкозема, как и высшими растениями, в конечном счете приведет к формированию почвенных агрегатов, гумуса и горизонта А<sub>1</sub>. Безусловно, выживание мелкоколониальных форм прокариот будет этому способствовать. Развитие этих форм в техногенных условиях означает

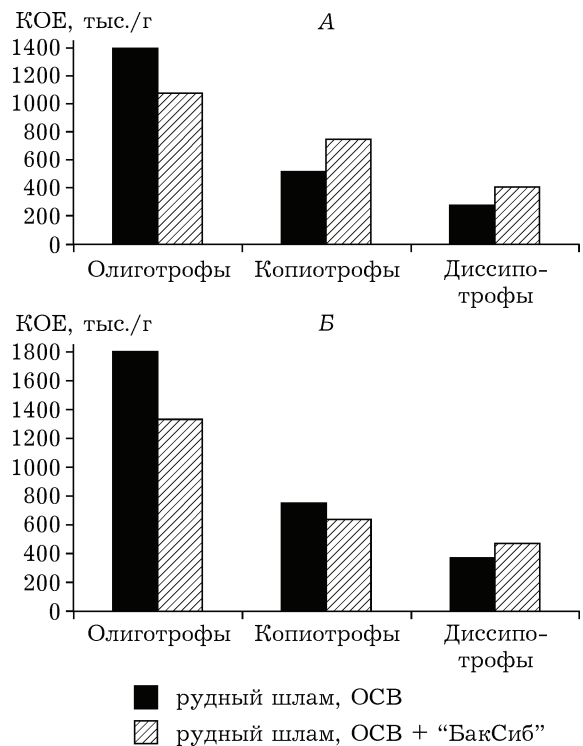


Рис. 5. Жизнеспособный пул микроорганизмов: А – психрофилов, Б – мезофилов в прикорневой зоне многолетних трав

проявление эволюционно сложившихся способов переживания популяцией неблагоприятных условий внешней среды. Полученный материал согласуется с информацией, полученной ранее для высокогорных скальных пород [3] и городских почв [18–20]. Как утверждает Л. В. Лысак, “именно мелкие формы бактерий являются пулом, представляющим собой жизнеспособные, находящиеся в особом анабиотическом состоянии клетки,

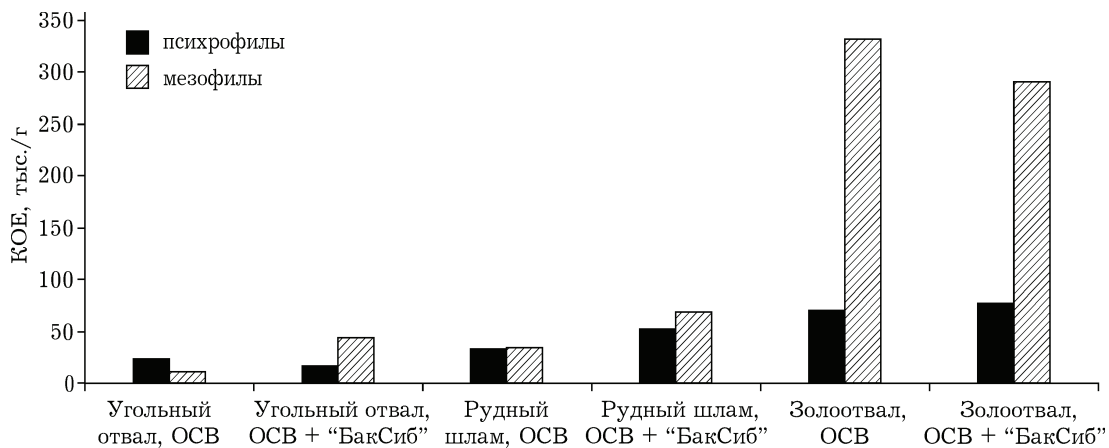


Рис. 6. Жизнеспособный пул микромицетов на фоне почвоулучшителей

обеспечивающие сохранение бактериального разнообразия в неблагоприятных условиях". Н. А. Красильников еще 55 лет назад пришел к заключению, что "бактерии могут существовать в формах, чаще всего в виде измельченных клеточных элементов, в форме кокковидных образований уменьшенных размеров или в форме мельчайших зародышевых телец. Эти измельченные формы ведут свое самостоятельное существование неопределенно долгое время" [4]. В последние годы интерес к разнообразию морфофизиологических форм прокариот, в том числе интенсивно изучаемых в нашей стране и за рубежом нанобактерий, называемых также "нано-", или ультрамикробактериями, фильтрующимися бактериями, возрос. Активизировался интерес и к мумифицированным и цистоподобным покоящимся клеткам, клеточным цианобактериальным формам протопластного типа, т. е. без муреинового слоя и наружной мембраны клеточной стенки – в виде L-форм, что рассматривается как явление адаптационного характера, проявляющееся в условиях длительного голодания. Гетероморфизм бактерий известен давно и широко представлен в природе. Можно предположить, что в техногенных условиях среды обитания прокариот изменение стратегий их существования и поведения с поддержанием жизнеспособности реально. Значительная часть автохтонных почвенных бактерий, как известно, характеризуется очень мелкими размерами, что и определяет их высокую устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В техногенных почвах, формирующихся на угольных отвалах и промышленных шлаках, существуют жизнеспособные бактерии и грибы в экологически значимом количестве. По отношению к питательным субстратам преобладают олиготрофы, в том числе диссипотрофы, присутствуют копиотрофы. Олиготрофный блок микроорганизмов включает психро-, мезо- и термофильные виды. Рекультивация и использование почвоулучшителей позитивно отражаются на биогенности почв, что проявляется в увеличении числа олиго-

нитрофилов, иммобилизаторов минерального азота и целлюлозолитиков. Последние обеспечивают выживание диссипотрофов, использующих низкомолекулярные продукты гидролиза полимера целлюлозы. Выживание мелкоколониальных бактерий и цианобактериальных прокариот в виде биопленок свидетельствует о проявлении эволюционно закрепившихся способах их существования. Поглощение цианобактериями биогенных элементов, в том числе тяжелых металлов, возможно, активизирует их вовлечение в биологический круговорот. Техногенные почвы, формирующиеся на угольных отвалах, наиболее насыщены микроорганизмами разных эколого-физиологических групп, отчего действие почвоулучшителей наиболее выражено. Биогенность почв, формирующихся на золо- и рудных шлаках, ниже. Судьба этих почв во многом зависит от остаточного содержания вредных примесей, активности процессов хелатообразования, восстановления окисных форм металлов, выщелачивания их из минералов. Поскольку водный режим таких почв неустойчив, а нейтральные и щелочные условия среды обитания в аэробной обстановке преобладают, то активная миграция катионогенных элементов, железа, серы, меди и других экотоксикантов какое-то время будет ограничена. К внесению биопрепарата "Баксиб" по фону ОСВ следует относиться более внимательно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Водолеев А. С., Андроханов В. А., Клековкин С. Ю. Почвоулучшители: рекультивационный аспект. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2007.
2. Андроханов В. А., Овсянникова С. В., Курачев В. М. Техноземы: свойства, режимы, функционирование. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2000.
3. Красильников Н. А. Микрофлора высокогорных скальных пород и азотфиксирующая деятельность // Успехи совр. биологии. 1956. Т. XLI, вып. 2. С. 177–192.
4. Красильников Н. А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
5. Аристовская Т. В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1980.
6. Клевенская И. Л. Эволюция микробиоценозов и их функций // Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.
7. Куксн М. С., Шушуева М. Г. Водоросли отвалов Листвянского угольного карьера Южного Кузбасса //

- Водоросли, грибы и лишайники лесостепной и степной зон Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1973.
8. Шушуева М. Г. Водорослевые группировки гидротвалов Кузбасса // Водоросли, грибы и лишайники лесостепной и степной зон Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1973.
  9. Шушуева М. Г. Формирование водорослевых группировок на отвалах угольных разработок в Кузбассе // Природные комплексы низших растений Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977.
  10. Баулина О. И. Ультраструктурная пластичность цианобактерий. М.: Научный мир, 2010.
  11. Нетрусов А. И., Бонч-Осмоловская Е. А., Горленко В. М. и др. Экология микроорганизмов. М.: Изд. центр "Академия", 2004.
  12. Артамонова В. С. Эволюция фототрофных микробных сообществ // Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.
  13. Рагим-заде Фикрат Кафар-оглы. Техногенные элювии вскрышных пород угольных месторождений Сибири, оценка их потенциального плодородия и пригодности для восстановления почвенного покрова: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1977.
  14. Патент № 2375698 "Способ определения фракционного восстановленных веществ отвалов каменноугольных разрезов".
  15. Кузяков Я. В. Трансформация низкомолекулярных органических азотсодержащих соединений в почве // Почвоведение. 1996. № 12. С. 1430–1439.
  16. Звягинцев Д. Г. Почвы и микроорганизмы. М.: МГУ, 1987.
  17. Карпачевский Л. О. Экологическое почвоведение. М.: Изд-во МГУ, 1993.
  18. Лысак Л. В., Лапыгина Е. В., Конова И. А., Звягинцев Д. Г. Численность и таксономический состав ультрамикробактерий в почвах // Микробиология. 2010. Т. 79, № 3. С. 428–432.
  19. Лысак Л. В., Лапыгина Е. В., Конова И. А., Звягинцев Д. Г. Численность и состав наночастиц бактерий в некоторых почвах России // Почвоведение. 2010. № 7. С. 819–824.
  20. Лысак Л. В. Бактериальные сообщества городских почв: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2010. 47 с.

## **Ecologic-Physiological Diversity of Microbial Communities in the Technogenic Landscapes of Kuzbass**

V. S. ARTAMONOVA, V. A. ANDROKHANOV, D. A. SOKOLOV, I. V. LYUTYKH,  
V. V. BULGAKOVA, S. B. BORTNIKOVA\*, A. S. VODOLEEV\*\*

*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS  
630099, Novosibirsk, Sovetskaya str., 18  
E-mail: artamonova@issa.nsc.ru*

*\*A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS  
630090, Novosibirsk, Koptyug ave., 3*

*\*\*Kuzbass State Pedagogical Academy  
654027, Novokuznetsk, Pionersky ave., 13*

Viable pool of microorganisms detected in the upper layer of technogenic soil formed on coal dumps, ash dumps and ore slurry are considered. The ecological-physiological features of oligotrophic bacteria are analyzed. The biofilms of prokaryotes and tiny colonial forms were revealed. The effect of recultivation and soil improvers on the major groups of microorganisms was demonstrated.

**Key words:** disturbed industrial territories, stored wastes, recultivation, soil improvers, heavy metals, landscaping, microbes, Kuzbass.