

ИННОВАЦИОННЫЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И РЕМЕДИАЦИЯ ИМПАКТНЫХ ЭКОСИСТЕМ

В.Н. Башкин, зав. лаб. Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, проф., д-р. биол. наук, vladimirbashkin@yandex.ru

Рецензент: С.И. Колесников, ФГАУ ВО «Южный федеральный университет», д-р с.-х. наук, colesnikov@sfedu.ru

Предложен пакет инновационных биогеохимических природоподобных технологий, защищенных патентами РФ, для управления микробным блоком биогеохимических циклов при рекультивации и ремедиации импактных экосистем.

Ключевые слова: инновации, природоподобные технологии, биогеохимические технологии, нарушенные почвы, загрязненные почвы, импактные экосистемы.

INNOVATIVE BIOGEOCHEMICAL TECHNOLOGIES: RECLAMATION AND REMEDIATION OF IMPACT ECOSYSTEMS

V.N. Bashkin, Head of Department, Institute of Physical, Chemical, and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Ph. D., Professor, vladimirbashkin@yandex.ru

A package of innovative biogeochemical nature-like technologies, protected by patents of the Russian Federation, is proposed for managing the microbial block of biogeochemical cycles during the reclamation and remediation of impact ecosystems.

Keywords: innovations, nature-like technologies, biogeochemical technologies, destroyed soils, polluted soils, impact ecosystems.

Введение

Под биогеохимическими технологиями рекультивации нарушенных и загрязненных почв и экосистем подразумеваются технологии, направленные на восстановление их биогеохимической структуры, прежде всего на уровне микробного блока. Такие технологии называются еще природоподобными. Также они являются инновационными, обладают новизной и защищаются соответствующими патентами [1].

В основу различных биогеохимических технологий заложены принципы управления стратегиями развития микробных сообществ в различных компонентах экосистем, в почвах, природных водах, растениях. В целом смена доминирующей экологической стратегии микробного сообщества почвы является механизмом адаптации почвенных микроорганизмов к изменению экологической ситуации. Именно на понимание физико-химических и биологических механизмов и управление на этой основе адаптацией микробиома и направлено применение биогеохимических технологий. Целью работы, соответственно, является рассмотрение технологических приемов восстановления биогеохимических циклов в условиях различных загрязнений и нарушений в различных природных регионах, в импактных экосистемах в зонах развития газовой промышленности.

Оценка и восстановление микробного звена биогеохимических циклов

В условиях усиления континентальности климата в полярных регионах на фоне нарушения растительного покрова как за счет промышленной нагрузки, так и в результате перемены

паса северных оленей происходит растепление почвогрунтов. Это сопровождается рядом отрицательных геоэкологических и эпидемиологических последствий. В частности, в течение жаркого лета 2016 г. наблюдалась вспышка эпидемии сибирской язвы, обусловленная выходом на поверхность почвы могильников умерших еще в 1940-х гг. животных. Возбудителем этой болезни является бактерия *Bacillus anthracis* [2, 3]. При этом очаги болезни не были своевременно выявлены, в первую очередь из-за недостаточно развитой сети санитарно-эпидемиологических станций на огромной территории полуострова Ямал, что и способствовало развитию эпизоотии. Это предопределило необходимость разработки простой природоподобной биогеохимической технологии для первичной оценки микробного загрязнения.

Была разработана инновационная технология оперативной оценки микробного загрязнения природных вод, защищенная патентом на изобретение РФ № 2735756. В основе этой технологии – отбор с определенных мест выпаса скота образцов навоза, которые высушивают (при комнатной температуре) и просеивают (через сито с ячейками диаметром 3 мм). Затем в сухих и водных пробах из навоза определяют микробное загрязнение путем анализа активности фермента дегидрогеназы. В табл. 1 приведены показатели статистически доказанного микробного загрязнения воды.

Таблица 1

Идентификация микробного загрязнения водной среды из навоза крупного рогатого скота посредством анализа активности фермента дегидрогеназы

№ пробы	Соотношение «навоз:вода»	Активность фермента дегидрогеназы, мкг 2-, 3-, 5-трифенилформазона – $C_{19}H_{16}N_4/(г \cdot сут)$ [проба № 1] и мкг $C_{19}H_{16}N_4/(мл \cdot сут)$ [пробы № 2, 3, 4 и 5]	Количество микробов, клеток/г [проба № 1] и клеток/мл [пробы № 2, 3, 4 и 5]
1	1:0	667	$2.2 \cdot 10^9$
2	1:1	248	$0.7 \cdot 10^8$
3	1:2	177	$5.2 \cdot 10^6$
4	1:3	59	$1.7 \cdot 10^6$
5	1:4	33	$1.0 \cdot 10^6$

При этом значения активности фермента дегидрогеназы были подтверждены результатами анализа количества микробов, продуцирующих данный фермент в различных пробах. Так, проба сухого навоза № 1 как первичного очага микробов характеризуется максимальными значениями активности фермента дегидрогеназы, 667 мкг $C_{19}H_{16}N_4/(г \cdot сут)$, и количеством микробов, $2.2 \cdot 10^9$ клеток/г, продуцирующих данный фермент. В водных пробах навоза № 2, 3, 4 и 5 как вторичного очага микробов при расширении соотношения «навоз:вода» в ряду 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4 активность фермента пропорционально падает в зависимости от количества микробов. Следует отметить, что если результаты анализа показывают нулевое значение активности фермента дегидрогеназы, то это означает полное отсутствие микробного загрязнения водной среды из навоза.

Предложенный метод позволяет оперативно (в течение 1 суток):

- идентифицировать микробное загрязнение водной среды из навоза скота, происходящее в результате просачивания через навоз дождевых и талых вод, которые образуют поверхностные и внутрипочвенные стоки;
- обеспечить высокую точность и качество оценки эпидемиологической ситуации, вызванной патогенными микробами на территориях пастбищного скотоводства, первичным очагом которых может быть навоз больных животных;
- обосновать принятие профилактических или ремедиационных мер, чтобы избежать инфицирования местного населения через загрязненные поверхностные и подземные водоисточники, используемые для питьевых целей.

Соответственно, как только при избыточной пастбищной нагрузке растительный покров оказывается полностью поврежденным или фрагментированным, что способствует формированию на положительных (выпуклых) формах рельефа обнажений почвогрунтов, соответственно, механизм эпизоотии может запускаться. Таким образом, восстановление почвенно-растительного покрова является наиболее эффективным путем предотвращения эпизоотии.

Технологический регламент рекультивации почв нарушенных участков в арктических регионах

Технологический регламент рекультивации почв нарушенных участков заключается в следующем.

На первой стадии:

а) на крупномасштабной картосхеме территории (масштаб 1:200 000 и крупнее), предназначенной для рекультивации почв, выделяют отдельные участки с нарушенными и загрязненными почвами и почвогрунтами с измерением их площадей, а также определяют места расположения торфяных залежей, откуда будет использоваться торф для рекультивации;

б) с указанных участков и залежей отбирают, соответственно, усредненные репрезентативные образцы почвы и торфа (из слоя 0–5–6 см) как для определения механического (гранулометрического) состава или полной влагоемкости почвы, так и в целях последующего выбора дозы торфа в виде соотношения «торф:почва», необходимого для рекультивации конкретного участка;

в) механический (гранулометрический) состав почвы, т.е. относительное содержание в ней частиц различной величины (гранул), определяют в случае рекультивации почв на территориях с волнистым рельефом и неоднородным почвенным покровом;

г) полную влагоемкость почвы, т.е. наибольшее количество влаги, которое содержится в почве при полном насыщении всех пор, определяют в случае рекультивации почв на территориях с равнинным или слаборасчлененным рельефом и однообразным почвенным покровом;

д) в течение зимнего периода проводят аналитические работы и серии вегетационных и модельных опытов для определения требуемых технологических параметров с гарантированным результатом рекультивации.

Вторая стадия:

а) на основе выбранного соотношения «торф:почва» рассчитывают как массу торфа, заделываемую в 0–5–6 см слой нарушенной почвы, так и массу самой нарушенной почвы в слое 0–5–6 см, исходя из площади рекультивируемого участка;

б) массу торфа предварительно доводят до рассыпчатого состояния путем воздушной сушки, что необходимо для удобства его равномерного распределения по всей площади рекультивируемого участка и дальнейшей заделки в искомый слой почвы;

в) заделку торфа в соответствующих дозах в 0–5–6 см слой нарушенной почвы участка и посев семян смеси многолетних злаковых трав осуществляют по принципу устройства газонов на больших площадях или методом «залужения», т.е. создания сплошного травяного покрова на участке, используя соответствующие технологии и технику;

г) в составе травосмеси, формируемой из многолетних злаковых трав, могут быть пырейник сибирский (*Elymus sibiricus*), кострец безостый (*Bromus inermis*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), овсяница красная (*Festuca rubra*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), тимopheевка луговая (*Phleum pratense*) и другие виды, которые позволяют получить густой травостой и плотный дерн на рекультивируемом участке;

д) эффективным приемом повышения устойчивости произрастания вновь создаваемых фитоценозов на нарушенных почвах является посев вышеуказанной травосмеси с включением различных видов местной флоры.

Третья стадия:

а) для улучшения посевных свойств семян, регулирования состояния растений на различных стадиях их роста и развития, в процессе формирования их продуктивности, а также повышения устойчивости растений к неблагоприятным воздействиям внешней среды применяют препарат гумат калия, используемый в определенных дозах для замачивания семян перед посевом, корневой подкормки и некорневой подкормки (опрыскивания) в период вегетации, с использованием соответствующих технологии и техники;

б) препарат гумат калия выделяют оригинальным способом из местных торфов Ямало-Ненецкого автономного округа, когда извлечение, прежде всего гуминовых кислот, из гумуса торфа и их очистка производится по всем правилам продуцирования химически чистых веществ, практически не затрагивающих молекулярные структуры гуминовых кислот, что в конечном счете гарантирует получение стабильного препарата гумата калия;

в) дальнейший уход за растительностью на рекультивируемом участке осуществляют, также используя соответствующие технологии и технику; при изреживании (по тем или иным причинам) травостоя проводят дополнительный посев семян многолетних злаковых трав;

г) в целом об эффективности рекультивации нарушенных почв с использованием торфа и гумата калия судят по результатам сравнительного анализа биохимической активности, и в частности активности фермента дегидрогеназы рекультивируемой нарушенной почвы и ненарушенной (фоновой) почвы, определяемой методом спектрофотометрии (согласно патенту РФ № 2387996).

Биогеохимические технологии рекультивации пирогенных и загрязненных углеводородами почв и нейтрализации углеводородных шламов

Биогеохимические технологии рекультивации пирогенных и загрязненных углеводородами почв и нейтрализации углеводородных шламов включают технологические подходы к восстановлению биогеохимической структуры и плодородия пирогенных почв, к очистке почв от нефти, газового конденсата и к обезвреживанию углеводородных шламов. Данные технологии были успешно апробированы *in situ* и *in vitro* в нарушенных и загрязненных экосистемах в различных почвенно-климатических условиях страны: в Московской области (55°37' с.ш., 37°44' в.д.) и Ставропольском крае (45°03' с.ш., 43°16' в.д.) в целях восстановления почв импактных экосистем.

1. Апробация биогеохимической технологии рекультивации пирогенной почвы *in situ* в Ставропольском крае

Биогеохимическая технология рекультивации была апробирована *in situ* для восстановления пирогенной темно-каштановой почвы бермы амбара, т.е. полосы, прилегающей к круглому контуру данного объекта газовой промышленности (Ставропольский край). Причиной случайного возгорания исследуемой темно-каштановой почвы бермы амбара вместе с произрастающей на ней растительностью могла быть ее насыщенность углеводородами газового конденсата, поступающими в составе жидких отходов, образуемых при очистке полости газопроводов и резервуаров, что придавало высокую горючесть и привело к пирогенному образованию терракотового цвета.

Следует отметить, что возгорание почвы может происходить при концентрациях углеводородов в 4–8 раз меньших, чем концентрации, при которых горючее вещество способно выделиться в отдельную фазу и образовать жидкие скопления на поверхности почвы [4].

Как видно из табл. 2, пирогенная почва существенно отличается от фоновой почвы по физико-химическим и биохимическим характеристикам.

Низкое значение $pH_{\text{сол.}}$ пирогенной почвы связано с тем, что изначально содержащиеся в ней углеводороды газового конденсата (RH) под действием возгорания превращались в малоустойчивые гидропероксиды (ROOH), распадающиеся с образованием различных окисленных соединений, в том числе кислот, что способствовало сильному подкислению почвы.

В результате термического процесса также уменьшилось содержание в почве тонкодисперсной фракции – ила и глины, что привело к относительному возрастанию количества песка.

Таблица 2

Физико-химическая и биохимическая характеристика почв (Ставропольский край)

Почва	рН _{сол.}	Содержание, %			Активность ферментов, %	
		ил, <0,001 мм	физическая глина, <0,01 мм	физический песок, >0,01 мм	каталаза	дегидрогеназа
Фоновая	5,7	26,0	54,4	45,6	100	100
Пирогенная	3,6	4,3	32,2	67,8	23,8	4,7

Исследования также показали, что активность каталазы и дегидрогеназы пирогенной почвы была очень низкой, соответственно 23,8 и 4,7% от активности фоновой почвы. Минимальная активность данных ферментов связана с тем, что при пирогазации почвы выживает только небольшой пул термотолерантных форм микроорганизмов, которые сохраняются в адсорбированном состоянии на обугленных материалах и во внутренней их части, не затронутой воздействием огня [5, 6].

Рекультивация пирогенной почвы производилась следующим образом: предварительно на берме амбара обустроивали делянки (0,25 м²), в которые после разрыхления почвы (слой 0–15 см) заделывали биокомпост «Пикса» [7] в дозах 6,5 и 13,0 кг/м²; затем осуществляли посев смеси многолетних злаковых трав – мятлика лугового (*Poa pratensis*), овсяницы красной (*Festuca rubra*), райграса пастбищного (*Lolium perenne*), гребенника обыкновенного (*Cynosurus cristatus*), полевицы белой (*Agrostis alba*) и полевицы обыкновенной (*Agrostis vulgaris*). Контрольный вариант представлял собой делянку без внесения биокомпоста, но с посевом и выращиванием трав. Отбор проб почвы и растений на анализ производили на 42-е сутки. Эффективность рекультивации пирогенной почвы оценивали посредством определения активности ферментов каталазы и дегидрогеназы, а также биомассы смеси многолетних злаковых трав.

Как видно из рис. 1, внесение биокомпоста «Пикса» в пирогенную почву повышало активность ферментов каталазы и дегидрогеназы в зависимости от дозы, соответственно, в 1,4 и 1,6, в 2,5 и 3,0 раза относительно контрольного варианта.

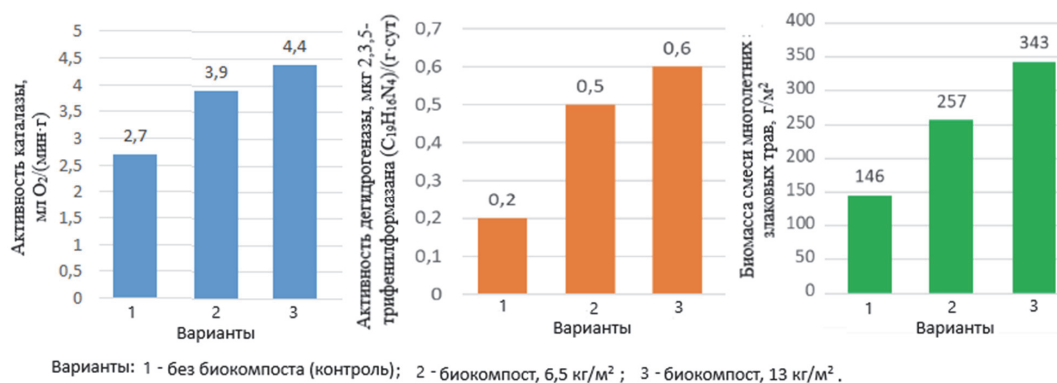


Рис. 1. Активность ферментов и биомасса смеси многолетних злаковых трав при рекультивации пирогенной почвы с помощью биокомпоста «Пикса» (Ставропольский край)

Биомасса смеси многолетних злаковых трав возростала с повышением дозы вносимого в почву биокомпоста, соответственно, в 1,8 и 2,3 раза относительно контрольного варианта.

Следовательно, применение биогеохимической технологии ремедиации пирогенной почвы на берме амбара *in situ* в Ставропольском крае позволило восстановить ее плодородие (повышение активности исследуемых ферментов и рост смеси многолетних злаковых трав). Это свидетельствует о восстановлении микробного звена биогеохимического круговорота. Эта технология может быть востребованной при восстановлении земель, подвергшихся возгоранию вследствие различных аварийных ситуаций, например в газовой промышленности.

2. Апробация биогеохимической технологии рекультивации почвы, загрязненной газовым конденсатом, *in situ* в Ставропольском крае

Биогеохимическая технология рекультивации почвы, загрязненной газовым конденсатом, *in situ* была апробирована на территории дожимной компрессорной станции (Ставропольский край) с черноземной тяжелосуглинистой почвой ($\text{pH}_{\text{сол.}}$ 7,1–7,3). Хроническое загрязнение данной почвы в результате поступления газового конденсата из «продувочной свечи» (вертикальной трубы с оголовком) выразилось как в постоянном ощущении специфического запаха бензиновых и керосиновых компонентов данного вещества, так и в полном отсутствии растительности на определенной площади вокруг «продувочной свечи» (рис. 2).



Рис. 2. Хроническое загрязнение черноземной почвы газовым конденсатом из «продувочной свечи» на территории дожимной компрессорной станции: 1 – фоновый участок с растительностью; 2 – участок, загрязненный газовым конденсатом и лишенный растительности, Ставропольский край (45°03' с.ш., 43°16' в.д.)

Для оценки процесса рекультивации почвы, загрязненной газовым конденсатом, выделяли делянки (0,25 м²), в которые после разрыхления почвы (слой 0–6 см) заделывали биокомпост «Пикса» в дозах 4 и 8 кг/м² и выращивали смесь многолетних злаковых трав (30 г семян на 1 м²): мятлика лугового (*Poa pratensis*), овсяницы красной (*Festuca rubra*), полевицы белой (*Agrostis alba*) и др.

Контрольный вариант представлял собой делянку без внесения биокомпоста, но с посевом и выращиванием трав. Отбор проб почвы и растений на анализ производили на 42-е сутки. Эффективность рекультивации почвы, загрязненной газовым конденсатом, оценивали посредством определения активности ферментов каталазы и дегидрогеназы, а также биомассы смеси многолетних злаковых трав, согласно патентам РФ на изобретения: № 2387995; № 2387996].

Анализ содержания углеводов газового конденсата в поверхностном слое почвы (0–6 см), проведенный методом инфракрасной спектроскопии, показал неравномерный характер хронического загрязнения участка вокруг «продувочной свечи», т.е. на разных участках количество вещества колебалось в пределах 1,8–5,4 г/кг. Интересно отметить, что эти количества оказались одного порядка с содержанием углеводов, отмечаемым в почвах вокруг ряда автозаправочных станций (1,9–8,2 г/кг), что определяется состоянием динамического равновесия процессов испарения и сорбции веществ, зависящим от гидротермических условий. В целом это свидетельствует об идентичности техногенной нагрузки на окружающую среду двух различных источников высококипящих фракций углеводородов (газового конденсата, бензина и дизельного топлива).

При внесении в почву биокомпоста активность ферментов каталазы и дегидрогеназы повышалась соответственно в 1,9 и 2,4, в 5,8 и 8,9 раза по сравнению с контрольным вариантом (рис. 3).

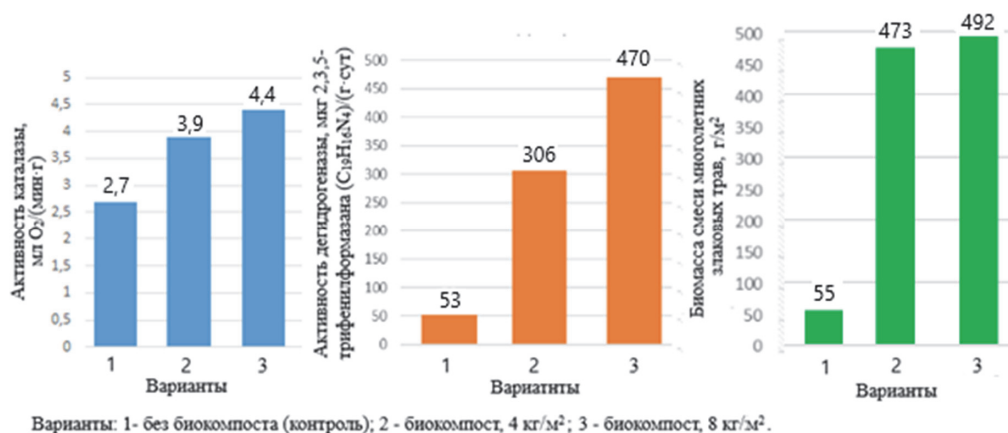


Рис. 3. Активность ферментов и биомасса смеси многолетних злаковых трав при рекультивации почвы, загрязненной газовым конденсатом, с помощью биокомпоста «Пикса» (Ставропольский край)

Активности каталазы и дегидрогеназы при внесении биокомпоста возрастали, что свидетельствует об эффективности ремедиации почвы, загрязненной газовым конденсатом, в разложении которого непосредственное участие принимают исследуемые ферменты.

Вес биомассы растений при внесении биокомпоста в дозах 4 и 8 кг/м² был существенно выше по сравнению с контролем. Происходит восстановление микробного блока и, как следствие, плодородия почвы и растительного покрова.

Применяемая биогеохимическая технология позволяет снизить эрозию почвы, а следовательно, избежать явной угрозы геологической устойчивости инженерно-технических сооружений газовой промышленности. При этом хроническое загрязнение почвы газовым конденсатом на участке вокруг «продувочной свечи» определяет необходимость осуществления постоянного наблюдения за состоянием травостоя, при изреживании которого необходимо возобновлять внесение биокомпоста, посев и выращивание смеси многолетних злаковых трав.

3. Апробация биогеохимической технологии нейтрализации шлама газового конденсата *in situ* в Ставропольском крае

Биогеохимическая технология нейтрализации была апробирована *in situ* при обезвреживании шлама газового конденсата, хранившегося в пруде-накопителе в одном из объектов газовой промышленности Ставропольского края. Пруд-накопитель представляет собой

объект повышенного риска из-за постоянного испарения токсических веществ с открытой поверхности в атмосферный воздух и возможности их случайного возгорания.

В целях апробации биогеохимической технологии нейтрализации отбирали пробы шлама газового конденсата из пруда-накопителя в пластиковые сосуды (объем 5 л) в 6-кратной повторности с последующим внесением в них биокомпоста «Пикса» в соотношении 1:1 и гомогенизацией полученной смеси. Сосуды инкубировали под навесом во избежание попадания в них атмосферных осадков, с периодическим перемешиванием содержимого (каждые 7 суток). Отбор проб шлама газового конденсата производили на 42-е сутки для анализа активности ферментов каталазы и дегидрогеназы, принимающих непосредственное участие в разложении углеводов.

Было установлено, что при добавлении биокомпоста «Пикса» в шлам газового конденсата даже в соотношении 1:1, активность ферментов как каталазы, так и дегидрогеназы сразу возрастала от нулевого значения, соответственно, до 3,3 мл O_2 /(мин·г) и 11,0 мг 2-, 3-, 5-трифенилформазана ($C_{19}H_{16}N_4$)/(г·сут). В данных условиях нейтрализации шлама газового конденсата четко проявился сопряженный характер действия ферментов по типу линейной функции, когда отщепляемый дегидрогеназой водород от молекул углеводов газового конденсата передается кислороду воздуха с образованием пероксида водорода, разложение которого осуществляет каталаза. Это подтверждает работоспособность микробиоценоза.

Таким образом, биогеохимические технологии рекультивации пирогенных и загрязненных углеводородами почв, а также нейтрализации углеводородных шламов, основу которой составляют способы, защищенные патентами Российской Федерации на изобретения, были успешно апробированы *in vitro* и *in situ* в основном на объектах газовой промышленности в других почвенно-климатических условиях страны (Ставропольский край). Показано восстановление биогеохимического круговорота в его микробном звене и плодородия нарушенных и загрязненных почв в импактных экосистемах.

Создание искусственных почв

Создание искусственных почв также основывается на применении биогеохимических технологий. Практика создания искусственных почв в России (СССР) имеет давнюю историю, включая создание почвенного покрова на промышленных отвалах (терриконах), строительных площадках, городских территориях и т.д. Эти технологии уже были использованы в 1980–1990-х гг. именно для создания искусственных почв в Объединенных Арабских Эмиратах и включали создание профиля почвы мощностью 50–70 см, состоящего из последовательных слоев песка, гравия, суглинка и плодородного слоя (15–20 см) из смеси верхового или низинного торфа, обогащенного питательными элементами и соответствующими гуминовыми препаратами и утяжеленного по механическому составу путем добавления глины и песка в различных соотношениях в зависимости от функционального использования территории. Необходимые условия для применения и обеспечения приживаемости искусственно созданных почв в странах Персидского залива заключаются, в частности, в подготовке местности (песчаных почв), фиксации плодородного слоя почвы в открытой местности, поддержании необходимой температуры и влажности создаваемых почв, сохранении почвенного микробиома, в защите от прямых солнечных лучей. Эти технологические приемы могут быть также отработаны, и их применимость зависит от конкретных условий, например от толщи песчаных отложений, или выбирается необходимый слой песка и формируется искусственная почва, или же, если поверхностные слои сложены глинами и суглинками, то в данном слое выбирается необходимая глубина для создания именно плодородного слоя. Фиксация же плодородного слоя, как правило, обеспечивается методами создания газонного покрытия, включая выращивание газонной смеси адаптированных к конкретным условиям растений и/или наложение рулонных газонов. Влажность почвы поддерживается с помо-

щью конструирования систем капельного орошения, что технологически хорошо отработано, защита от инсоляции — специальными пленками-покрытиями на первоначальный период или созданием рассеянного теневого растительного покрытия в последующие периоды. Тем не менее еще существуют нерешенные проблемы, связанные с ненадежностью технологий формирования водоудерживающего слоя. Как одно из технологических решений возможно формирование водоудерживающего слоя в профиле искусственных почв с применением сорбентов (слоистых минералов).

Следующим классом задач является создание антропоземов — искусственных почв для городских условий, в частности для Московского мегаполиса. Несмотря на многолетние научно-практические и производственные разработки, до сих пор существуют нерешенные проблемы: быстрая сработка почвенного слоя из-за воздействия выбросов автотранспорта, прежде всего оксидов азота. С применением биогеохимических технологических подходов решением могут быть разработка и применение консорциумов микроорганизмов, устойчивых к загрязнениям.

Близкой к возможности использования биогеохимических природоподобных технологий видится и задача создания искусственных почв на поверхности углетвалов, отвалов вскрышных пород карьеров, хвостохранилищ, шламовых амбаров. В данном случае неудачи предшествующих разработок по фиторемедиации и фиторекультивации связаны с наличием большой массы ЗВ, включая ТМ, ПАУ и СОЗ, а также с плохими водно-физическими свойствами. Необходим подбор различных органических и неорганических сорбентов для устранения вредного действия ЗВ, что требует разработки сорбционных биогеохимических технологий.

Инновационные биогеохимические технологии для реабилитации загрязненных и нарушенных экосистем

Биогеохимические технологии, представленные в табл. 3, регулируют работоспособность микробного звена биогеохимических круговоротов в различных импактных экосистемах.

Таблица 3

Биогеохимические технологии для управления нарушениями и загрязнениями в импактных экосистемах

Технология	Технологические принципы	Патенты/ссылки
Метод подготовки образцов для изотопного анализа азота	Оценка параметров микробной минерализации	Авторское свидетельство СССР, 1982, № 1043565
Метод определения азотминерализующей способности почв	Оценка минерализующей способности почв	Авторское свидетельство СССР, 1983 № 1206703
Метод оценки биodeградации пестицидов	Оценка восстановления нативной микрофлоры	Авторское свидетельство СССР, 1991, № 5005241
Метод оценки очищения почв от остатков пестицидов	Реабилитация загрязненных почв	Авторское свидетельство СССР, 1994, № 1836636
Метод прогнозирования поведения азота в агроэкосистемах	Оценка минерализующей способности почв	Авторское свидетельство СССР, 1995, № 1753415
Способ контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности каталазы	Реабилитация загрязненных почв	Патент РФ 2387995, зарегистрирован 27.04.2010
Способ контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязненных почв	Патент РФ 2387996, зарегистрирован 27.04.2010

Окончание таблицы 3

Технология	Технологические принципы	Патенты/ссылки
Способ контроля эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2491137, зарегистрирован 27.08.2013
Способ оценки эффективности рекультивации посредством торфа нарушенных тундровых почв с различной полной влагоемкостью	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2611159, зарегистрирован 21.02.2017
Способ получения гумата калия из местных торфов Ямало-Ненецкого автономного округа	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2610956, зарегистрирован 17.02.2017
Способ оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв посредством внесения местного торфа и гумата калия	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2611165, зарегистрирован 21.02.2017
Способ диагностики хронического и аварийного загрязнения почв тяжелыми металлами посредством анализа активности фермента дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязненных почв	Патент РФ на изобретение № 2617533, зарегистрирован 25.04.2017
Способ биохимического контроля эффективности рекультивации нарушенных и загрязненных тундровых почв	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2672490, зарегистрирован 15.11.2018
Способ идентификации источника и времени загрязнения окружающей среды и биологических субстратов человека пестицидом ДДТ в регионах Крайнего Севера	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязненных почв	Патент РФ на изобретение № 2701554, зарегистрирован 30.09.2019
Способ идентификации микробного загрязнения водной среды посредством анализа активности фермента дегидрогеназы	Оценка восстановления нативной микрофлоры при загрязнении водных экосистем	Патент РФ на изобретение № 2735 756, зарегистрирован 06.11.2020

Список биогеохимических технологий, представленный в табл. 3 — далеко не исчерпывающий. Близкими являются различные технологические подходы, способствующие восстановлению нативной микрофлоры, например, при загрязнении агропочв тяжелыми металлами и нефтепродуктами [8], и другие приемы и методы, направленные на регулирование биогеохимической структуры экосистем в целом. Необходима дальнейшая разработка биогеохимических технологий, направленных на восстановление БГХ-циклов также и в агроэкосистемах, в первую очередь в микробном звене, регулирующем потоки поллютантов.

Совместимость биогеохимических технологий с производственными процессами

Проведение совместных научно-исследовательских работ с ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ООО «Газпром добыча Ямбург» выразилось в создании целого ряда инновационных биогеохимических технологий для рекультивации и диагностики как загрязненных, так и нарушенных почв (см. табл. 3).

При этом необходимо понимать, что эти технологии должны быть совместимы с другими технологиями и технологическими процессами, используемыми на газодобывающих предприятиях. Так, во всех проектах обустройства и реконструкции нефтегазоконденсатных месторождений представлен раздел оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), предусматривающий проведение мероприятий по снижению воздействия возводимых и эксплуатируемых газопромысловых объектов на окружающую среду. Предусматриваются и мероприятия по рекультивации нарушенных и загрязненных земель. Однако реализация плана ОВОС не всегда достигает поставленной цели, что может быть связано как с особенностями технологического объекта, так и с невыявленными параметрами импактных экосистем.

Следовательно, изучение и количественная параметризация закономерностей биогеохимической организованности в импактных экосистемах всегда должна базироваться на фундаментальных знаниях в рамках биогеохимического инжиниринга и, как правило, завершаться разработкой инновационных природоподобных биогеохимических технологий управления устойчивостью экосистем в зонах газодобычи. Именно такие технологии являются наиболее работоспособными в условиях полярных экосистем и должны использоваться в рамках разделов ОВОС при эксплуатации месторождений. Инновационный характер найденных решений подтверждается их патентной защитой.

Заключение

Полученные данные позволили разработать комплекс биогеохимических технологий, защищенных патентами РФ, применительно к восстановлению как загрязненных, так и нарушенных почв. Разработанные биогеохимические технологии являются адаптивными к природно-климатическим условиям Крайнего Севера, ныне характеризующимся усилением континентальности климата. Именно в таких условиях на территории Тазовского полуострова была апробирована *in vitro* и *in situ* и в настоящее время успешно реализуется биогеохимическая технология рекультивации тундровых почв, нарушенных вследствие добычи и транспортировки природного газа. При этом рекультивация тундровых почв способствует предотвращению их растепления и повышает инженерную устойчивость инфраструктурных объектов.

Аналогичным образом эти технологии применяются и в других почвенно-климатических условиях, их работоспособность показана, в частности, и в условиях импактных экосистем Ставропольского края.

В большинстве случаев эти инновационные природоподобные технологии можно использовать для создания информационных тест-моделей при планировании широкомасштабных рекультивационных работ как в районах Крайнего Севера, так и в других импактных регионах.

Работа выполнена в рамках темы Минобрнауки России: «Биогеохимические процессы трансформации минерального и органического вещества в почвах на различных стадиях эволюции биосферы и техносферы» – 121041500050-3.

Список литературы

1. Башкин В.Н. Инженерная биогеохимия и биогеохимические технологии // Инноватика и экспертиза. 2018. Вып. 2 (23). С. 140–144.
2. Попова А.Ю., Демина Ю.В., Ежлова Е.Б., Куличенко А.Н., Рязанова А.Г., Малеев В.В., Плоскирева А.А., Дятлов И.А., Тимофеев В.С., Нечепуренко Л.А., Харьков В.В. Вспышка сибирской язвы в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 году, эпидемиологические особенности // Проблемы особо опасных инфекций. 2016. Вып. 4. С. 42–46.
3. Башкин В.Н., Припутина И.В., Галиулина Р.А. Управление природными и экологическими рисками при усилении континентальности климата // Проблемы анализа риска. 2023. Т. 20. № 2. С. 68–85. URL: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-2-68-85> (дата обращения: 23.04.2025).

4. Галишев М.А. Исследование пожарной опасности дисперсных систем // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2017. № 1 (22). С. 17–23.

5. Зайдельман Ф.Р., Романов С.В. Эколого-гидротермическая оценка пирогенно-измененных и дерново-пирогенных почв выработанных торфяных месторождений // Почвоведение. 2007. № 1. С. 93–105.

6. Тен Хак Мун, Имранова Е.Л., Кириенко О.А. Влияние пожара на микробный комплекс почвы // Почвоведение. 2003. № 3. С. 362–369.

7. Семенцов А.Ю., Антипов Б.В., Прохоров И.С., Мизгирев Н.С., Башкин В.Н. Применение суперкомпоста «Пикса» для очистки загрязненных нефтепродуктами почв // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 10. С. 14–18.

8. Bashkin V.N. Biogeochemical Engineering: Technologies for Managing Environmental Risks // Adv Environ Eng Res, 2022; 3(4): 040; DOI: 10.21926/aer.2204040.

References

1. Bashkin V.N. (2018) *Inzhenernaya biogeokhimiya i biogeokhimicheskie tekhnologii* [Engineering biogeochemistry and biogeochemical technologies] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. Moscow. Issue 2 (23), P. 140–144.

2. Popova A.Yu., Demina Yu.V., Ezhlova E.B., Kulichenko A.N., Ryazanova A.G., Maleev V.V., Ploskireva A.A., Dyatlov I.A., Timofeev V.S., Nechepurenko L.A., Kharkiv V.V. (2016) *Vspyshka sibirskoy yazvy v Yamalo-Nenetskom avtonomnom okruge v 2016 godu, epidemiologicheskie osobennosti* [Anthrax outbreak in the Yamalo-Nenets Autonomous District in 2016 epidemiological data of the Russian Federation] *Problemy osobo opasnykh infektsiy* [Problems of especially dangerous infections]. Issue 4. P. 42–46.

3. Bashkin V.N., Priputina I.V., Galiulina R.A. (2023) *Upravlenie prirodnykh i ekologicheskimi riskami pri uspenenii kontinentalnosti klimata* [Management of natural and environmental risks when climate continentality is enhanced]. Vol. 20. No. 2. P. 68–85. Available at: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-2-68-85> (data of access: 23.04.2025).

4. Galishev M.A. (2017) *Issledovanie pozharnoy opasnosti dispersnykh sistem* [Investigation of fire hazard of dispersed systems] *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of GPS EMERCOM of Russia]. No. 1 (22). P. 17–23.

5. Zaidelman F.R., Romanov S.V. *Ekologo-gidrotermicheskaya otsenka pirogenno-izmenennykh i dernovo-pirogennykh pochv vyrabotannykh torfyanykh mestorozhdeniy* [Ecological and hydrothermal assessment of pyrogenically altered and sod-pyrogenic soils of developed peat deposits] *Pochvovedenie* [Soil Science] 2007. No. 1. P. 93–105.

6. Ten Hak Moon, Imranova E.L., Kirienko O.A. (2003) *Vliyanie pozhara na mikrobnyy kompleks pochvy* [Influence of fire on the microbial complex of the soil] *Pochvovedenie* [Soil Science]. No. 3. P. 362–369.

7. Sementsov A.Yu., Antipov B.V., Prokhorov I.S., Mizgirev N.S., Bashkin V.N. (2006) *Primenenie superkomposta «Piksa» dlya ochistki zagryaznennykh nefteproduktami pochv* [Application of the «Pix» supercompost for cleaning soils contaminated with petroleum products] *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas industry]. No. 10, P. 14–18.

8. Bashkin V.N. (2022) Biogeochemical Engineering: Technologies for Managing Environmental Risks. Adv Environ Eng Res, 2022; 3(4): 040; DOI: 10.21926/aer.2204040.