

Э. Р. Бабаев (к.х.н., доц.)^{1а}, П. Ш. Мамедова (д.х.н., проф.)^{1б},
К. Р. Гахраманова (докторант)^{1б}, Ф. Г. Муштагова (докторант)²

УСПЕХИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ БИОРЕМЕДИАЦИИ

¹ Институт химии присадок им. акад. А.М. Гулиева Министерства науки и образования Азербайджана,
присадок Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,

^а лаборатория «Защитные органические соединения»,

^б лаборатория «Смазочно охлаждающие композиции»,

Республика Азербайджан, AZ 1029, г. Баку, Беюкшорское шоссе, 2062 квартал

² Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики

Республика Азербайджан, AZ 1029, г. Баку, пр. Нефтяников, 73; e-mail: elbeibabaev@yahoo.de

E. R. Babaev¹, P. Sh. Mamedova¹, K. R. Gakhramanova¹, F. G. Mushtagova²

ACHIEVEMENTS IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF BIOREMEDIATION METHODS

¹ Academician A. M. Guliyev Institute of Chemistry of Additives

Beyukshor Highway, Block 2062, Baku, AZ 1029, Republic of Azerbaijan

² State Oil Company of the Azerbaijan Republic

73, Prospekt Neftyanikov Str., AZ1029, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: elbeibabaev@yahoo.de

Проанализированы различные подходы к поиску биологических агентов для восстановления природных объектов. Представлены результаты использования различных групп бактерий, грибов и водорослей в процессах очистки почвы от нефтепродуктов и пестицидов. Показаны результаты собственных исследований авторов в области изучения нефтедеструктурирующей способности различных микроорганизмов и установлено, что под влиянием микробиологических процессов возрастает степень окисленности нефти за счет увеличения содержания карбонилсодержащих соединений.

Ключевые слова: биокультивация; биоремедиация почвы; детоксикация; микроорганизмы; фито- и микоремедиация

Загрязнение биосферы представляет собой серьезный риск как для здоровья человека, так и для природной среды. Из-за своей токсичности и небио-разлагаемости в окружающей среде накапливается широкий спектр загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы, полихлорированные бифенилы, пластики и различные агрохимикаты¹. Биоремедиация – это эффективный подход для удаления токсичных отходов, который набирает популярность в последние годы. Различные микроорганизмы, включая аэробы и анаэробы, используются в биоремедиации для обработки загрязненных

Various approaches to the search for biological agents for the restoration of natural objects are analyzed. The results of using various groups of bacteria, fungi, and algae in the removal of oil products and pesticides from natural objects are presented. The authors' own research on the oil-degrading capacity of various microorganisms is shown, and it is established that microbiological processes increase the degree of oil oxidation due to an increase in the content of carbonyl-containing compounds.

Key words: biocultivation; detoxification; microorganisms; phyto- and mycoremediation; soil bioremediation

участков. Микроорганизмы играют важную роль в биоремедиации, учитывая, что это процесс, в котором опасные отходы и загрязняющие вещества устраняются, разлагаются, детоксифицируются и иммобилизуются. Загрязняющие вещества разлагаются и преобразуются в менее токсичные формы, что является основной целью биоремедиации. Биоремедиация *ex situ* или *in situ* может использоваться в зависимости от различных факторов с учетом стоимости того или иного метода, типов загрязняющих веществ и их концентраций.

Зеленая биоремедиация – это инновационная и быстро развивающаяся технология, которая

Дата поступления 12.04.25

обещает большие перспективы для решения проблемы токсичных отходов в загрязненной среде. Загрязняющие вещества сохраняются в окружающей среде из-за их устойчивости к биodeградации, представляя значительную угрозу для экосистем и живых организмов. Основная цель биоремедиации – разложить эти вредные вещества на менее токсичные соединения. Однако непрерывный выброс загрязняющих веществ из различных отраслей промышленности приводит к тому, что они накапливаются быстрее, чем их можно устранить. Хотя для решения этой проблемы было разработано множество методов, поиск безопасных и эффективных решений продолжается ². Методы естественной ремедиации включают использование искусственных водно-болотных угодий, фиторемедиацию и применение микроорганизмов, таких как бактерии, грибы, цианобактерии и водоросли. Микроорганизмы играют ключевую роль в успехе биоремедиации, поскольку они обладают способностью устранять, разлагать, детоксифицировать и иммобилизовать опасные отходы и загрязняющие вещества. Процесс включает использование различных типов микроорганизмов, включая аэробы и анаэробы, для эффективной обработки загрязненных участков.

В работе ³ отмечается, что спрос на нефть и нефтепродукты растет с каждым днем, в то время как разливы нефти и неправильный сброс промышленных отходов способствуют росту загрязнения окружающей среды нефтяными углеводородами. Разливы нефтяных углеводородов вызывают различные канцерогенные и нейротоксические эффекты, и поэтому требуются эффективные стратегии очистки. Различные физические и химические методы, которые в настоящее время используются, являются дорогостоящими и оставляют токсичные остатки в окружающей среде. Напротив, биоремедиация является многообещающей технологией в обработке загрязнений нефтяными углеводородами из-за ее высокой эффективности, низкой стоимости и экологической синергии.

Управление биомедицинскими отходами является неотъемлемой частью здравоохранения, поскольку является основой чистоты, гигиены и технического обслуживания в лечебных учреждениях ⁴. Медицинская помощь имеет решающее значение для здоровья человека, но неправильное управление биомедицинскими отходами наносит вред флоре и фауне экосистемы на Земле и плохо влияет на здоровье человека. Биомедицинские отходы вредны из-за своей потенциальной канцерогенности, генотоксичности и мутагенности. Текущие методы утилизации, используемые при утилизации биомедицинских отходов, включают сточные воды/стоки, сжигание и захоронение.

Эти методы обычно являются дорогостоящими и могут преобразовывать загрязняющие вещества из одной токсичной формы в другую. В то же время биоремедиация является недорогим методом использования природных микроорганизмов или растений для детоксикации антропогенных загрязняющих веществ до безвредных продуктов, которые также делают почву плодородной. Исследователи разработали генетически модифицированные микробы для очистки окружающей среды от загрязнителей, включая радионуклиды. Фиторемедиация также является типом устойчивых методов, которые являются разумными и компетентными в обращении с тяжелыми металлами и радиоактивными отходами, образующимися в больницах ⁴.

В связи с быстрым ростом населения по всему миру спрос на сельскохозяйственные продукты питания увеличивается ⁵. Для повышения урожайности на сельскохозяйственных полях применяются различные виды пестицидов, большинство из которых известны своим пагубным воздействием на окружающую среду и здоровье человека. Эти вещества являются стойкими, поэтому необходимо удалять эти загрязнители из окружающей среды. Первоначально обработка пестицидов полностью производилась путем захоронения и сжигания, но это приводит к образованию вторичных загрязнителей в окружающей среде. В последние десятилетия биоремедиация приобрела огромное значение из-за своей эффективности и способности разлагать загрязнители на нетоксичные вещества, например, микробы успешно используются для удаления пестицидов из воды.

В последние годы возрастает роль геомикробиологии – это междисциплинарная область исследований, которая изучает роль микроорганизмов в геологическом процессе с момента зарождения Земли и их перспективы относительно будущего Земли ⁶. Ученые сосредоточились на взаимодействии микробов и минералов в различных процессах, таких как биовыветривание, трансформация и образование биоминералов, чтобы лучше понять роль микробов в геологических процессах. Эти процессы являются частью геохимических циклов элементов, некоторые из которых являются необходимыми питательными веществами для жизни, а другие токсичны для жизни. Микроорганизмы являются основными агентами геомикробиологии из-за их важной деятельности в биовыветривании горных пород и минералов. С их участием просходит мобилизация и иммобилизация металлов, а также образование новых биоминералов. Актуальным направлением становится генетическая модификация этих микробов с целью повышения их специфичности для использования в различных стратегиях биореме-

диации при удалении и растворении загрязняющих веществ в окружающей среде.

В работах ^{7,8} отмечается, что в процессах биоремедиации модификация и/или разложение загрязняющих веществ происходит за счет микроорганизмов, в то время как при фиторемедиации для этих целей используются растения. Разлагаемыми веществами при этом могут быть отходы пищи, нефтяные углеводороды, органопестициды, пластик и тяжелые металлы, фармацевтические препараты и средства личной гигиены, а также перфторалкильные и полифторалкильные вещества. Для повышения эффективности применяют иммобилизацию микробных/микроводорослевых клеток, создание микробных/микроводорослевых консорциумов и использование добавок. Микробы, микроводоросли и растения с хорошей способностью удалять загрязнители должны быть объединены с инженерными методами, основанными на их интерактивных механизмах среди биоассоциации и загрязнителей на молекулярном уровне.

В работах ^{9,10} также отмечается ключевая роль микроорганизмов в процессах биоремедиации и показано, что деградация и преобразование таких загрязнителей, как углеводороды, нефтепродукты, тяжелые металлы, пестициды, красители и т. д. осуществляется ферментативным путем посредством метаболизма, при этом биотические и абиотические условия определяют скорость деградации. В настоящее время распространяются такие методы, как биостимуляция, биоаугментация, биовентиляция и биоослабление.

На протяжении многих лет проводились обширные исследования бактериальной деградации диоксинов и родственных им соединений, включая карбазол, поскольку эти химикаты очень токсичны и широко распространены в окружающей среде ¹¹. Существует настоятельная необходимость в изучении и разработке большего количества штаммов бактерий с уникальными катаболическими свойствами для эффективной очистки загрязненных диоксинами участков. Карбазол имеет химическую структуру, похожую на диоксины, и пути деградации этих двух химикатов в высокой степени аналогичны. Было показано, что некоторые штаммы бактерий, деградирующие карбазол, обладают способностью деградировать диоксины, такие как штамм *Pseudomonas sp.* CA10 и *Sphingomonas sp.* KA1. Введение штамма KA1 в загрязненную диоксином модельную почву привело к деградации 96% и 70% 2-хлордибензо-*n*-диоксина (2-CDD) и 2,3-дихлордибензо-*n*-диоксина (2,3-DCDD) соответственно после 7-дневного инкубационного периода. Эти скорости деградации были аналогичны достигнутому со штаммом CA10, который удалил 96% 2-CDD и 80% 2,3-DCDD из

той же модельной почвы. Таким образом, карбазол-разрушающие бактерии имеют значительные перспективы в качестве потенциальных кандидатов для биоремедиации диоксинов.

Сообщается ¹², что разведка, добыча и переработка сырой нефти привели к серьезной деградации окружающей среды в нефтедобывающих сообществах региона дельты реки Нигер в Нигерии. Усиленная биоремедиация почвы тропического леса, искусственно загрязненной сырой нефтью, биоаугментированной азотфиксирующими бактериями (NFB) и биостимулированной птичьим пометом, проводилась *ex situ*. Образец почвы был взят на глубине 15 см из почвы тропического леса Университета Порт-Харкорта, Нигерия. NFB был выделен из корней бобового растения *Arachis hypogea*, идентифицированного как вид *Nitrobacter*. Биоаугментация путем применения NFB служила вариантом А, вариант В (биостимуляция путем применения птичьего помета), вариант С (без внесения поправок) служил контролем. Биоремедиация контролировалась в течение 28 дней с интервалом в 14 дней и определялась с использованием процентного соотношения общих потерь нефтяных углеводородов (ТРН) за каждый период к ТРН в начальный день (нулевой день). Результаты общего количества культивируемых гетеротрофных бактерий (ТСНВ) показали, что самый высокий диапазон наблюдался в варианте В. Аналогично, количество бактерий, использующих углеводороды (HUB), имело более высокий диапазон в варианте В. Изменения физико-химических параметров в ходе исследования показали снижение нитрата, фосфата и ТРН во всех вариантах, за исключением pH, который показал небольшое увеличение в варианте С. Характеристика и идентификация бактерий выявили следующие роды HUB: *Pseudomonas*, *Citrobacter*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Micrococcus*, *Klebsiella*, *Staphylococcus* и *Nitrobacter*. Процент потерь ТРН по результатам газовой хроматографии (ГХ) показал следующее: вариант А (44,24%), вариант В (61,08%) и вариант С – контроль (27,28%) соответственно. Результаты этого исследования показали, что применение птичьего помета в качестве биостимулятора было более эффективным, чем применение NFB в улучшенной биоремедиации почвы, загрязненной сырой нефтью, поэтому использование птичьего помета, который доступен как органические отходы, экологически чистый и экономически эффективный, рекомендуется в качестве биостимулятора для улучшенной биоремедиации при экологической очистке загрязненных сырой нефтью участков в районе дельты реки Нигер в Нигерии.

Углеводородные отходы, включая остатки сырой нефти в днищах резервуаров, представляют собой постоянную и растущую экологическую проблему во всем мире, поскольку они особенно устойчивы в окружающей среде и могут вызывать широкий спектр серьезных негативных последствий для здоровья всех биологических объектов¹³. Биоремедиация предлагает устойчивую обработку, которая снижает уровни загрязняющих веществ, присутствующих в почве, например, до субтоксичных концентраций или приводит их в соответствие с критериями соответствия для безопасного использования или утилизации. При этом риск после выброса в окружающую среду снижается. Целью данного исследования была оценка потенциала бактериального консорциума, изолированного от ранее загрязненных сред, как для выживания в загрязненных средах, так и для разложения выветренной сырой нефти. Значительные изменения в отработанной нефти произошли в результате инкубации с микробными консорциумами, включая эмульгирование, потерю вязкости и снижение содержания углеводородов, особенно в высокоуглеродной цепи (область C₂₀–C₇₀). Профилирование микробного сообщества с использованием денатурирующего градиентного гель-электрофореза подтвердило влияние добавления микробных консорциумов на повышение разнообразия микрофлоры. Идентификация последовательностей отдельных штаммов, присутствующих в микробных консорциумах, идентифицировала *Pseudomonas sp.*, а также несколько некультивируемых гамма-протеобактерий. Результат подчеркивает потенциал углеводородокластических бактериальных консорциумов для использования в биоремедиации.

В работе¹⁴ был поставлен лабораторный эксперимент, чтобы продемонстрировать способность микробов очищать пляжный песок, загрязненный нефтяными углеводородами. Загрязненная нефтью почва использовалась в качестве источника инокулята для бактерий, разлагающих углеводороды (HDB), в то время как загрязненный нефтью пляжный песок использовался в качестве объекта очистки. Рост HDB в инокуляте был обогащен и стимулирован путем добавления питательных веществ в форме витаминов и минералов, а также добавления нефтяных отходов в качестве источника углерода. Эксперимент проводился в течение пяти недель. Микроскопическое наблюдение ясно показало взаимодействие между микробом и нефтяным загрязнителем как в образцах обогащения, так и в образцах биоремедиации. Показано, что примерно 25% массы нефтяных углеводородов в загрязненном пляжном песке было биodeградировано в течение одного месяца.

Хотя микробная рекультивация широко используется в биоремедиации различных загрязняющих веществ, в практическом применении биологической рекультивации применение чистых культур микроорганизмов ограничено и определяется их адаптивностью, эффективностью и способностью справляться с несколькими загрязняющими веществами¹⁵. Смешанные культуры микроорганизмов включают симбиоз двух или более микроорганизмов. Такие культуры демонстрируют набор характеристик каждого вида или штамма микроорганизмов, демонстрируя огромный потенциал в биоремедиации органических или тяжелых металлических загрязняющих веществ. Эта работа фокусируется на смешанных культурах микроорганизмов, демонстрируя их важность и суммируя преимущества смешанных культур микроорганизмов в биоремедиации.

Тяжелые металлы (ТМ) широко распространены и жизненно важны, но их накопление в организмах может быть опасным. Свинец (Pb) в последнее время привлекает значительное внимание из-за его разрушительного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. В работе¹⁶ рассмотрены источники ТМ и стратегии рекультивации. Авторы предлагают решение для устранения проблемы токсичности и накопления Pb в пищевой цепи через эндофитные бактерии, поскольку они обладают высокой эффективностью в лечении токсичности свинца. Также показан механизм действия этих микробов в снижении токсичности свинца.

Сточные воды кожевенных заводов вносят значительный вклад в загрязнение экосистемы такими веществами, как тяжелые металлы¹⁷. Сточные воды обычно содержат тяжелые металлы, а также больше бактерий, которые могут процветать в такой среде. Биоремедиация изначально проводилась с использованием бактерий; в последние десятилетия внедрение «иммобилизованных» бактерий получило признание как интригующий метод благодаря многообразной помощи. Авторы изучали различные детерминированные аспекты использования иммобилизованных бактерий для восстановления окружающей среды с акцентом на инкапсуляцию в биоматериалы и их роль в детоксикации токсичных соединений. Также описаны преимущества и недостатки использования иммобилизованных бактерий в ферментерах для очистки сточных вод кожевенных заводов.

В работе¹⁸ описаны экстремофилы – особая группа микроорганизмов, способных выживать в экстремальных условиях, таких как экстремальные температуры, уровни pH и высокие концентрации солей. Благодаря своим уникальным ферментам и адаптивным способностям экстремофи-

лы хорошо подходят в качестве катализаторов для приложений экологической биотехнологии, включая биоремедиацию ТМ с помощью различных стратегий. Возможные механизмы действия экстремофильных бактерий на тяжелые металлы: исключение металлов с помощью барьера проницаемости; внеклеточная секвестрация металла путем связывания белка/хелатора; внутриклеточная секвестрация металла путем связывания белка/хелатора; ферментативная детоксикация металла в менее токсичную форму; активный транспорт тяжелых металлов; пассивная толерантность; снижение чувствительности клеточных мишеней к ионам металлов; морфологическое изменение клеток. Показано, что генная инженерия экстремофильных бактерий в стрессовых средах может помочь в биоремедиации загрязненных участков. Однако структура и биохимические свойства экстремофильных бактерий, а также любые возможные долгосрочные эффекты их применения требуют дальнейшего изучения.

В работе ¹⁹ показано, что свойство некоторых видов бактерий и водорослей извлекать тяжелые металлы, в том числе свинец, из своего окружения было использовано для очистки промышленных стоков. Первым шагом в разработке стратегии биоремедиации является выявление штаммов бактерий-кандидатов, способных модифицировать загрязнитель. Биотехнологические подходы рекомендуются для извлечения форм металлов, которые можно выращивать в прудах, куда сбрасываются стоки (богатые тяжелыми металлами); при этом микробы будут извлекать тяжелые металлы и изолировать их внутри своих клеточных мембран.

В работе ²⁰ внимание фокусируется на удалении шестивалентного хрома (Cr(VI)) с использованием местных штаммов бактерий, устойчивых к металлам, выделенных из обычной промышленной очистной станции, загрязненного участка в Вишакхапатнаме. Три изолята с высокой устойчивостью к металлам были проверены путем выращивания их в питательных агаровых средах, содержащих различные концентрации Cr(VI), в течение 24 ч при 35 ± 2 °C. Минимальные ингибирующие концентрации Cr(VI) трех штаммов были исследованы при нейтральном pH и температуре 35 ± 2 °C. Были определены морфологические, биохимические и молекулярные характеристики, и штаммы были идентифицированы как *Bacillus subtilis* NITSP1, *Rhizobium pusense* NITSP2 и *Pseudomonas aeruginosa* NITSP3. Элементный состав и анализ функциональных групп местных и нагруженных металлами клеток были выполнены с использованием энергодисперсионной спектроскопии и инфракрасной спектроско-

пии с преобразованием Фурье соответственно. Рабочие условия были оптимизированы с использованием анализа по одному фактору за раз. При сравнении с тремя бактериальными изолятами максимальное удаление Cr(VI) наблюдалось с *Bacillus subtilis* NITSP1 с начальной концентрацией Cr(VI) 60 мг/л, pH 7.0, содержанием инокулята 2% (об./об.) и инкубационным периодом 24 ч. Логистическая модель использовалась для прогнозирования изменения роста биомассы со временем. Это исследование может быть расширено для удаления тяжелых металлов из промышленных сточных вод экологически безопасным способом.

Удаление нефтяных загрязнителей из морских приливно-отливных отложений в условиях холодного климата является актуальной проблемой. Хотя биодоступность нефтяных углеводородов снижается при низких температурах, биосурфактанты могут способствовать биодеградации нефти ²¹⁻²³. Были изучены характеристики биосурфактантов, продуцируемых адаптированными к холоду нефтеразлагающими бактериями *Planococcus* sp. XW-1. Добавление биосурфактанта может эффективно способствовать растворимости фенантрена, пирена, дизельного топлива и сырой нефти. Растворимость была ограничена числом колец и молекулярной массой. Дополнительные биосурфактанты значительно вымыли сырую нефть, адсорбированную песком. С увеличением размера частиц эффективность удаления увеличилась с 87.9 до 94.28 %. После добавления биосурфактанта эффект деградации увеличился на 20% за 20 дней. Результаты показали, что бактерии-продуценты биосурфактанта *Planococcus* sp. XW-1 являются перспективным кандидатом для использования в *in situ* биоремедиации загрязненной нефтью литоральных осадков.

Многие бактерии способны восстанавливать оксианионы селена, в первую очередь селенит (SeO_3^{2-}), в большинстве случаев образуя наноструктуры селена(0). Механизмы этих преобразований могут различаться для разных видов бактерий и до сих пор не были детально выяснены ^{24, 25}. Бактерии рода *Azospirillum*, включая повсеместно распространенные фитостимулирующие ризобактерии, широко изучаются и имеют потенциал для сельскохозяйственной биотехнологии и биоремедиации чрезмерно селенистых почв, поскольку они способны восстанавливать ионы селенита. Культуры *A. brasilense* Sp7 и его производных (мутантные штаммы) выращивали на модифицированной жидкой малатной солевой среде в присутствии или в отсутствие селенита. Были использованы следующие методы: спектрофотометрический мониторинг роста бактерий; ингибирование синтеза глутатиона (GSH) в бактериях *L*-бутио-

нин-сульфоксимином (BSO); оптические анализы восстановления селенита и нитрита; трансмиссионная электронная микроскопия клеток, выращенных с BSO и/или селенитом и без них. В серии отдельных сравнительных исследований восстановления нитрита и селенита штаммом дикого типа *A. brasilense* Sp7 и его тремя специально отобранными производными (мутантными штаммами) с разными скоростями восстановления нитрита была обнаружена прямая корреляция между скоростями восстановления нитрита и селенита для всех штаммов, использованных в исследовании. Более того, для BSO было показано, что его присутствие не блокирует восстановление селенита в *A. brasilense* Sp7. Впервые были представлены доказательства для бактерий рода *Azospirillum*, что путь денитрификации, известный как присущий этим бактериям, включая нитритредуктазу, вероятно, участвует в восстановлении селенита. Результаты с использованием BSO также подразумевают, что детоксикация селенита через окислительно-восстановительную систему GSH (которая обычно рассматривается как основной механизм восстановления селенита у многих бактерий) не играет существенной роли в *A. brasilense*. Полученные знания о механизмах, лежащих в основе биогенных преобразований неорганического селена в *A. brasilense*, являются шагом вперед как в понимании биогеохимического цикла селена, так и в различных потенциальных нано- и биотехнологических применениях.

Существует высокий спрос на гербициды, основанный на необходимости увеличения производства сельскохозяйственных культур для удовлетворения мировых потребностей. Тем не менее, существуют негативные последствия использования гербицидов, проявляющиеся в форме появления устойчивых сорняков, производства токсичных метаболитов от частичной деградации гербицидов, изменений в микробных сообществах почвы и биогеохимических циклах, изменений в питании растений и плодородии почвы, а также постоянного загрязнения окружающей среды²⁶. Некоторые гербициды повреждают нецелевые микроорганизмы посредством направленного вмешательства в метаболизм хозяина и через механизмы окислительного стресса. По этим причинам необходимо определить устойчивые, эффективные методы смягчения этих экологических обязательств. Прежде чем процесс деградации может быть инициирован микробными ферментами и метаболическими путями, микроорганизмам необходимо выдерживать окислительные стрессы, вызванные самими гербицидами. Это может быть достигнуто с помощью сложной системы ферментативных и неферментативных систем антиокси-

дантного стресса. Многие из этих систем реагирования не являются специфическими для гербицидов, а скорее запускаются различными веществами. В совокупности эти неспецифические системы реагирования повышают потенциал выживания и приспособленности микроорганизмов. Исследования биodeградации и подходы к рекультивации опирались на индивидуально подобранные штаммы для эффективной рекультивации гербицидов в окружающей среде. Было показано, что микробные коммуникационные системы, которые модулируют социальные отношения и метаболические пути внутри структур биопленки среди микроорганизмов, являются сложными; поэтому использование изолированных штаммов для деградации ксенобиотиков необходимо улучшить с использованием подхода, основанного на сообществе, с интеграцией путей биodeградации. Понимание динамики микробных сообществ в свободноживущей микробиоте и тех, которые присутствуют в сложных сообществах и в биопленках, имеет первостепенное значение для достижения этих целей. Также крайне важно, чтобы страны, являющиеся крупными производителями продовольствия и потребителями пестицидов, имели доступ к этим технологиям для достижения устойчивого производства, не вызывая при этом последствий в виде неизвестных побочных эффектов.

В работах^{27–29} рассматривается роль грибов в процессах биоремедиации. Показано, что грибы обладают метаболической способностью расщеплять сложные молекулы. Биоремедиация грибами, также называемая микоремедиацией, чаще исследовалась в наземных, чем в водных экосистемах, хотя грибы также процветают в озерных и морских средах. Авторы проводят параллели между наземными и водными таксонами грибов и их ролью в микоремедиации. Они обсуждают способность грибов разлагать пестициды, фармацевтические препараты и средства личной гигиены, пластики, биопластики. Рассмотрена роль грибов в снижении степени загрязнения воды тяжелыми металлами. Кроме того, авторы обсуждают возможные стратегии микоремедиации в прикладных условиях и выделяют новые стратегии микоремедиации на основе ферментов.

Возвращаясь к актуальности загрязнения окружающей среды пестицидами, следует отметить ряд работ^{30–32}, в которых рассмотрены потенциальные микроорганизмы для биоремедиации: *Alcaligenes*, *Aspergillus*, *Aeromonas*, *Aureobasidium*, *Candida*, *Cellulosimicrobium*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Methanospirillum*, *Flavobacterium*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Rhodococcus*, *Rhodotorula*, *Sphingobium* и *Streptomyces*. Показано, что для

поддержания своего роста и метаболических процессов эти микроорганизмы могут использовать пестициды в качестве источников азота и углерода. В результате разнообразные микробные популяции могут процветать в жестких, загрязненных условиях и обладать значительной способностью к биодegradации, что позволяет им расщеплять и превращать пестициды в нетоксичные соединения.

В работе³³ оценивалась способность двух смешанных популяций фотосинтетических микроорганизмов, консорциума цианобактерий и зеленых микроводорослей (С1) и специального лабораторно разработанного консорциума цианобактерий и зеленых микроводорослей (С2), удалять органические и неорганические загрязнители из различных сточных вод. В ходе этих экспериментов консорциумы С1 и С2 выращивались как на искусственных, так и на реальных сточных водах, и их способность удалять органические и неорганические соединения оценивалась с помощью различных тестов. Концентрации биоразлагаемых органических веществ (БПК₅), нитратов, аммония и неорганического фосфора измерялись до и после очистки сточных вод фотосинтетической биомассой. В ходе пятидневного эксперимента, в котором консорциум выращивался на искусственных сточных водах, расчетная органическая нагрузка БПК₅ снизилась со 130 мг О₂ до нуля, что демонстрирует эффективность этих микроорганизмов в окислении органических соединений и очистке сточных вод. Кроме того, измеренные концентрации нитрата, аммония и неорганического фосфора выявили увеличение концентрации аммония и уменьшение концентрации нитрата, что привело к снижению на 9% для двух азотсодержащих соединений и снижению на 33% для неорганического фосфора. Увеличение концентрации аммония указывает на то, что его усвоение фотосинтетическим консорциумом в присутствии источников органического углерода менее интенсивно, чем его синтез микроорганизмами в реакционном сосуде. Напротив, снижение концентрации нитрата и неорганического фосфора указывает на то, что их усвоение больше, чем их синтез в присутствии источников органического углерода. Параллельные исследования проводились с реальными сточными водами в качестве среды роста. Аналогично экспериментам с искусственными сточными водами фотосинтетические консорциумы продемонстрировали свою способность окислять и удалять все органические соединения в течение пятидневного испытания. Результаты показали, что микробный консорциум эффективен в удалении как органических, так и неорганических соединений из сточных вод, при этом наблюдалось значитель-

ное снижение концентраций БПК₅, нитрата, аммония и неорганического фосфора. Это говорит о том, что фотосинтетические микроорганизмы могут быть перспективным решением для очистки сточных вод и восстановления питательных веществ. Это исследование привлекает внимание к чрезвычайно важной теме: взаимосвязи между фотосинтетическими и нефотосинтетическими бактериями при очистке сточных вод. Кроме того, время удерживания должно быть оптимизировано для оптимального удаления органических и неорганических соединений.

В наших работах^{34–39} были исследованы особенности изменения фракционного состава нефти после ее биодegradации различными микроорганизмами в загрязненных почвах нефтяного месторождения Бинагади на Апшеронском полуострове. В лабораторных условиях изучена деструктивная активность некоторых углеводородокисляющих культур и их ассоциаций, выделенных из нефтезагрязненных почв, в отношении углеводородов нефти. Нефедеструктивную активность исследуемых ассоциаций микроорганизмов оценивали по суммарному показателю, определяемому весовым методом убыли нефти и нефтепродуктов в жидкой среде. Фитотоксичность почв оценивалась биотестом с помощью семян пшеницы по соотношению числа проросших и не проросших семян, высоты проростков и длины корней. Проведен сопоставительный анализ результатов изучения особенностей изменения составов сырых нефтей и нефтяных загрязнений, подверженных микробиологической деструкции в жидкой минеральной среде и в почве. Использование метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье позволяет проанализировать особенности изменения химического состава загрязняющей почвы нефти под влиянием микробиологического окисления и предположить переход ее в более глубокую стадию дegradации. Полученные данные свидетельствуют о том, что микробиологические процессы способствуют ароматизации и депарафинизации компонентов исследованной нефти. Также было установлено, что под влиянием микробиологических процессов возрастает степень окисленности нефти за счет увеличения содержания карбонилсодержащих соединений. Следует отметить, что в спектрах наблюдаются полосы поглощения, обусловленные образованием соединений с неопредельной связью, а также азотсодержащих соединений. На основе полученных экспериментальных данных можно предположить, что исходная нефть переходит в более глубокую стадию дegradации.

Литература

1. Bala S., Garg D., Sharma M., Sridhar K. Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment // *Toxics*. – 2022. – V.10, №8. – Pp.484-492.
2. Visvanathan P., Kirubakaran Dh., Selvam K., Manimegalai P. Recent Strategies for Natural Bioremediation of Emerging Pollutants: Development of a Green and Sustainable Environment // Chapter 1 in book *Bioremediation of Emerging Contaminants in Water*. – 2021. – V.2. – Pp.1-19.
3. Chandra S., Sharma R., Singh K., Anima Sh. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon // *Annals of Microbiology*. – 2013. – V.63. – Pp.417-431.
4. Mohd S. Applications of Bioremediation in Biomedical Waste Management: Current and Future Prospects // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. – 2024. – V.67, №12. – Pp.375-392.
5. Patel N., Chaudhary V., Akansha P. Singh A. Application of Microbes in Bioremediation of Pesticides // Chapter in book *Environmental and Microbial Biotechnology*. – 2022. – Pp.555-571.
6. Muksy R., Odisho Kolo K., Abdullah Sh. Bacterial and Fungal-Mineral Interactions and their Application in Bioremediation – A Review // *Journal of Ecological Engineering*. – 2023. – V.24, №5. – Pp.1-13.
7. Chen-Jing L., Song D., Chun H., Peng G. Applications of bioremediation and phytoremediation in contaminated soils and waters: CREST publications during 2018-2022 // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2023. – V.53, №6. – Pp.723-732.
8. Rhodes C.J. Applications of Bioremediation and Phytoremediation // *Science Progress*. – 2013. – V.96, №4. – Pp.417-427.
9. Abatenh E., Gizaw B., Tsegaye Z., Wassie M. The role of microorganisms in bioremediation – A review // *Open Journal of Environmental Biology*. – 2023. – №4. – Pp.131-147.
10. Botlaq J-M., Mertz T., Otjen L. Role of Microorganisms in Soil Bioremediation // *Journal of American Chemical Society*. – 1994. – №3. – Pp.1-9.
11. Dinh M., Nguyen T., Huong L. The potential application of carbazole-degrading bacteria for dioxin bioremediation // *Bioresours Bioprocess*. – 2023. – V.10, №1. – Pp.56-67.
12. Wokem V., Momoh E.D. Application of nitrogen fixing bacteria and poultry droppings for enhanced bioremediation of crude oil polluted-soil // *Scientia Africana*. – 2021. – V.20, №1. – Pp.109-124.
13. Bird C., Adetutu E.M., Hancock N., Ball A. The application of hydrocarbonoclastic bacteria for the bioremediation of weathered crude oil // Chapter 2 in book *Microbes in Applied Research*. – 2012. – Pp.177-182.
14. Susilawati R. Bioremediation Experiment Using Hydrocarbon Degrading Bacteria // *Journal of Geology and Mineral Resources*. – 2019. – V.20, №1. – Pp.38-46.
15. Xue L., Chongling F., Min L., Yining H. Bioremediation of organic/heavy metal contaminants by mixed cultures of microorganisms: A review // *Open Chemistry*. – 2022. – V.20, №1. – Pp.793-807.
16. Faisal M. Lead: Natural Occurrence, Toxicity to Organisms and Bioremediation by Lead-degrading Bacteria: A Comprehensive Review // *Journal of Pure and Applied Microbiology*. – 2023. – V.17, №3. – Pp.1298-1319.

References

1. Bala S., Garg D., Sharma M., Sridhar K. [Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment]. *Toxics*, 2022, vol.10, no.8, pp.484-492.
2. Visvanathan P., Kirubakaran Dh., Selvam K., Manimegalai P. [Recent Strategies for Natural Bioremediation of Emerging Pollutants: Development of a Green and Sustainable Environment] Chapter 1 in book *Bioremediation of Emerging Contaminants in Water*, 2021, vol.2, pp.1-19.
3. Chandra S., Sharma R., Singh K., Anima Sh. [Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon]. *Annals of Microbiology*, 2013, vol.63, pp.417-431.
4. Mohd S. [Applications of Bioremediation in Biomedical Waste Management: Current and Future Prospects]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2024, vol.67, no.12, pp.375-392.
5. Patel N., Chaudhary V., Akansha P. Singh A. [Application of Microbes in Bioremediation of Pesticides]. Chapter in book *Environmental and Microbial Biotechnology*, 2022, pp.555-571.
6. Muksy R., Odisho Kolo K., Abdullah Sh. [Bacterial and Fungal-Mineral Interactions and their Application in Bioremediation - A Review] *Journal of Ecological Engineering*, 2023, vol.24, no.5, pp.1-13.
7. Chen-Jing L., Song D., Chun H., Peng G. [Applications of bioremediation and phytoremediation in contaminated soils and waters: CREST publications during 2018-2022]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023, vol.53, no.6, pp.723-732.
8. Rhodes C.J. [Applications of Bioremediation and Phytoremediation]. *Science Progress*, 2013, vol.96, no.4, pp.417-427.
9. Abatenh E., Gizaw B., Tsegaye Z., Wassie M. [The role of microorganisms in bioremediation – A review]. *Open Journal of Environmental Biology*, 2023, no.4, pp.131-147.
10. Botlaq J-M., Mertz T., Otjen L. [Role of Microorganisms in Soil Bioremediation]. *Journal of American Chemical Society*, 1994, no.3, pp.1-9.
11. Dinh M., Nguyen T., Huong L. [The potential application of carbazole-degrading bacteria for dioxin bioremediation]. *Bioresours Bioprocess*, 2023, vol.10, no.1, pp.56-67.
12. Wokem V., Momoh E.D. [Application of nitrogen fixing bacteria and poultry droppings for enhanced bioremediation of crude oil polluted-soil]. *Scientia Africana*, 2021, vol.20, no.1, pp.109-124.
13. Bird C., Adetutu E.M., Hancock N., Ball A. [The application of hydrocarbonoclastic bacteria for the bioremediation of weathered crude oil]. Chapter 2 in book *Microbes in Applied Research*, 2012, pp.177-182.
14. Susilawati R. [Bioremediation Experiment Using Hydrocarbon Degrading Bacteria]. *Journal of Geology and Mineral Resources*, 2019, vol.20, no.1, pp.38-46.
15. Xue L., Chongling F., Min L., Yining H. [Bioremediation of organic/heavy metal contaminants by mixed cultures of microorganisms: A review]. *Open Chemistry*, 2022, vol.20, no.1, pp.793-807.
16. Faisal M. [Lead: Natural Occurrence, Toxicity to Organisms and Bioremediation by Lead-degrading Bacteria: A Comprehensive Review]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2023, vol.17, no.3, pp.1298-1319.

17. Javam R.J., Chokkalingam P. A Review on Bioremediation of Tannery Effluent using Immobilized Bacteria // *Nature Environment and Pollution Technology*.– 2024.– V.23, №3.– Pp.1375-1386.
18. Sun J., Xing H., Yilin L., Rania A-T. Potential applications of extremophilic bacteria in the bioremediation of extreme environments contaminated with heavy metals // *J. Environ. Managem.*– 2024.– V.352.– Pp.120081-120087.
19. Chatterjee S., Mukherjee A., Sarkar A., Roy P. Bioremediation of lead by lead-resistant microorganisms, isolated from industrial sample // *Advances in Bioscience and Biotech.*– 2012.– V.3, №3.– Pp.290-295.
20. Padma S., Srivinas B., Ghanta K.Ch., Dutta S. Bioremediation of Cr(VI) using indigenous bacterial strains isolated from a common industrial effluent treatment plant in Vishakhapatnam // *Water Sci. Technol.*– 2023.– V.88, №11.– Pp.2889-2904.
21. Ping G., Wei X., Dan W., Tang S. Potential Application of Biosurfactant-Producing Bacteria for Bioremediation of Oil Polluted Marine Intertidal Sediments // *J. Mar. Sci. Eng.*– 2022.– V.10, №6.– Pp.731-739.
22. Mohanty M., Das S. Potential application of biosurfactant from marine bacteria in bioremediation // *Ocean Life*.– 2018.– V.2, №2.– Pp.59-72.
23. Diksha S., Rai J.P., Ghosh A., Chakraborty M. A review on biosurfactant producing bacteria for remediation of petroleum contaminated soils // *Biotech.*– 2022.– V.12, №9.– Pp.218-230.
24. Tugarova A.V., Mamchenkova P.V., Vladimirova A.A., Petrova L.P. Role of Denitrification in Selenite Reduction by *Azospirillum brasilense* with the Formation of Selenium Nanoparticles // *Front. Biosci.*– 2024.– V.29, №10.– Pp.361-369.
25. Tugarova A., Vetchinkina E.P., Loshchinina E.A., Kamnev A.A. Reduction of Selenite by *Azospirillum brasilense* with the Formation of Selenium Nanoparticles // *Microbial Ecology*.– 2014.– V.68, №3.– Pp.137-143.
26. Pileggi M., Sonia P., Sadowsky M. Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities // *Heliyon*.– 2020.– V.6, №12.– Pp.5767-5772.
27. Vaksmaa A., Cruz S.G., Ghosh P., Niemann H. Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants // *Frontiers in Marine Science*.– 2023.– V.10.– Pp.1070905-1070914.
28. AbuQamar S.F., Hassan A., Nader M., Zaghloul R.A. Exploiting fungi in bioremediation for cleaning-up emerging pollutants in aquatic ecosystems // *Marine Environmental Research*.– 2023.– V.190.– Pp.106068-106072.
29. Amobonye A., Aruwa C., Aransiola S., Oamame J. The potential of fungi in the bioremediation of pharmaceutically active compounds: a comprehensive review // *Front Microbiol.*– 2023.– V.12, №14.– Pp.1207792-1207799.
30. Wahla V., Shukla Sh. Role of Microorganisms in Bioremediation of Pesticides // Chapter in book *Research Anthology on Emerging Techniques in Environmental Remediation*, 2022, 27 p.
31. Ayilara M., Babalola O. Bioremediation of environmental wastes – the role of microorganisms // *Frontiers in Agronomy*.– 2023.– №2.– Pp.1-15.
32. Sharma R., Saroop Sh. Chapter 10. Role of microbes in pesticide bioremediation: Recent advances and
17. Javam R.J., Chokkalingam P. [A Review on Bioremediation of Tannery Effluent using Immobilized Bacteria. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2024, vol.23, no.3, pp.1375-1386.
18. Sun J., Xing H., Yilin L., Rania A-T. [Potential applications of extremophilic bacteria in the bioremediation of extreme environments contaminated with heavy metals]. *J. Environ. Managem.*, 2024, vol.352, pp.120081-120087.
19. Chatterjee S., Mukherjee A., Sarkar A., Roy P. [Bioremediation of lead by lead-resistant microorganisms, isolated from industrial sample]. *Advances in Bioscience and Biotech.*, 2012, vol.3, no.3, pp.290-295.
20. Padma S., Srivinas B., Ghanta K.Ch., Dutta S. [Bioremediation of Cr(VI) using indigenous bacterial strains isolated from a common industrial effluent treatment plant in Vishakhapatnam]. *Water Sci. Technol.*, 2023, vol.88, no.11, pp.2889-2904.
21. Ping G., Wei X., Dan W., Tang S. [Potential Application of Biosurfactant-Producing Bacteria for Bioremediation of Oil Polluted Marine Intertidal Sediments]. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2022, vol.10, no.6, pp.731-739.
22. Mohanty M., Das S. [Potential application of biosurfactant from marine bacteria in bioremediation]. *Ocean Life*, 2018, vol.2, no.2, pp.59-72
23. Diksha S., Rai J.P., Ghosh A., Chakraborty M. [A review on biosurfactant producing bacteria for remediation of petroleum contaminated soils]. *Biotech.*, 2022, vol.12, no.9, pp.218-230.
24. Tugarova A.V., Mamchenkova P.V., Vladimirova A.A., Petrova L.P. [Role of Denitrification in Selenite Reduction by *Azospirillum brasilense* with the Formation of Selenium Nanoparticles]. *Front. Biosci.*, 2024, vol.29, no.10, pp.361-369.
25. Tugarova A., Vetchinkina E.P., Loshchinina E.A., Kamnev A.A. [Reduction of Selenite by *Azospirillum brasilense* with the Formation of Selenium Nanoparticles]. *Microbial Ecology*, 2014, vol.68, no.3, pp.137-143.
26. Pileggi M., Sonia P., Sadowsky M. [Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities] *Heliyon*, 2020, vol.6, no.12, pp.5767-5772.
27. Vaksmaa A., Cruz S.G., Ghosh P., Niemann H. [Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, vol.10, pp.1070905-1070914.
28. AbuQamar S.F., Hassan A., Nader M., Zaghloul R.A. [Exploiting fungi in bioremediation for cleaning-up emerging pollutants in aquatic ecosystems]. *Marine Environmental Research*, 2023, vol.190, pp.106068-106072.
29. Amobonye A., Aruwa C., Aransiola S., Oamame J. [The potential of fungi in the bioremediation of pharmaceutically active compounds: a comprehensive review]. *Front Microbiol.*, 2023, vol.12, no.14, pp.1207792-1207799.
30. Wahla V., Shukla Sh. [Role of Microorganisms in Bioremediation of Pesticides]. Chapter in book *Research Anthology on Emerging Techniques in Environmental Remediation*, 2022, 27 p.
31. Ayilara M., Babalola O. [Bioremediation of environmental wastes – the role of microorganisms]. *Frontiers in Agronomy*, 2023, no.2, pp.1-15.
32. Sharma R., Saroop Sh. [Chapter 10 - Role of microbes in pesticide bioremediation: Recent advances and biotechnological implications] *Pesticides in the Environment*, 2024, pp.223-250.
33. Ardelean A.V., Moisesescu C., Cornea C. [Wastewater treatment using mixed consortia of microalgae and

- biotechnological implications // Pesticides in the Environment. – 2024. – Pp.223-250.
33. Ardelean A.V., Moisescu C., Cornea C. Wastewater treatment using mixed consortia of microalgae and cyanobacteria // 6-th International Conference Water resources and wetlands. – Romania. – 2023. – Pp.12-15.
34. Бабаев Э.Р. Микробиологическая деструкция нефти в почвах Апшеронского полуострова // Территория Нефтегаз. – 2017. – №11. – С.64-76.
35. Мамедова П.Ш., Кахраманова К.Р., Бабаев Э.Р., Алиева Х.Ш. Выделение активных углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязненных почв Сураханского месторождения // Азербайджанский химический журнал. – 2008. – №3. – С.59-62.
36. Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Мамедова П.Ш. Анализ активности отдельных штаммов-деструкторов нефтепродуктов и их ассоциаций для очистки нефтезагрязненных почв // Процессы нефтехимии и нефтепереработки. – 2008. – №3-4(35-36). – С.229-231.
37. Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Кулиева Д.М. Выбор оптимальных питательных сред и условий культивирования для активного роста микроорганизмов-деструкторов нефти // Процессы нефтехимии и нефтепереработки. – 2008. – №3-4(35-36). – С.177-181.
38. Бабаев Э.Р., Мовсумзаде М.Э. Преобразование нефти в процессе микробиологической деградации в почве // Баш. хим. ж. – 2009. – Т.6, №3. – С.80-85.
39. Бабаев Э.Р., Мовсумзаде М.Э., Мамедова П.Ш., Кулиева Д.М., Велиева Ф.М. Оптимизация состава питательных сред для нефтеокисляющих дрожжевых культур рода *Candida* // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2010. – №11. – С.46-51.
40. Babayev E.R. [Microbiological destruction of oil in the soils of the Apsheron Peninsula]. 6-th International Conference Water resources and wetlands, Romania, 2023, pp.12-15.
41. Babayev E.R. *Mikrobiologicheskaya destruktziya nefti v pochvakh Apsheronnskogo poluostrova* [Microbiological destruction of oil in the soils of the Apsheron Peninsula]. *Territoriya Neftegaz* [Territory of Oil and Gas], 2017, no.11, pp.64-76.
42. Mamedova P.Sh., Kahramanova K.R., Babayev E.R., Aliyeva H.Sh. *Vydeleniye aktivnykh uglevodorodokislyayushchikh bakteriy iz neftezagryaznennykh pochv Surakhanskogo mestorozhdeniya* [Isolation of active hydrocarbon-oxidizing bacteria from oil-contaminated soils of the Surakhani field]. *Azerbaydzhanskiy khimicheskiy zhurnal* [Azerbaijan Chemical Journal], 2008, no. 3, pp.59-62.
43. Farzaliyev V.M., Babayev E.R., Mamedova P.Sh. *Analiz aktivnosti otchel'nykh shtammov-destruktorov nefteproduktov i ikh assotsiatsiy dlya ochildki neftezagryaznennykh pochv* [Analysis of the activity of individual strains-destructors of oil products and their associations for cleaning oil-contaminated soils]. *Protsessy neftekhimii i neftepererabotki* [Processes of petrochemistry and oil refining], 2008, no. 3-4 (35-36), pp.229-231.
44. Farzaliyev V.M., Babayev E.R., Kuliyeva D.M. *Vybor optimal'nykh pitatel'nykh sred i usloviy kul'tivirovaniya dlya aktivnogo rosta mikroorganizmov-destruktorov nefti* [Selection of Optimal Nutrient Media and Cultivation Conditions for Active Growth of Oil-Degrading Microorganisms]. *Protsessy neftekhimii i neftepererabotki* [Petrochemical and Oil Refining Processes], 2008, no. 3-4 (35-36), pp.177-181.
45. Babayev E.R., Movsumzade M.E. *Preobrazovaniye nefti v protsesse mikrobiologicheskoy degradatsii v pochve* [Oil Transformation in the Process of Microbiological Degradation in Soil]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2009, vol.6, no.3, pp.80-85.
46. Babayev E.R., Movsumzade M.E., Mamedova P.Sh., Kuliyeva D.M., Velieva F.M. *Optimizatsiya sostava pitatel'nykh sred dlya nefteokislyayushchikh drozhzhevyykh kul'tur roda Candida* [Optimization of the Composition of Nutrient Media for Oil-Oxidizing Yeast Cultures of the Genus *Candida*]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskiye dostizheniya i peredovoy opyt* [Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Best Practices], 2010, no.11, pp.46-51.