

Ф. Хожанепесова<sup>1\*</sup>, А. Дадрасниа<sup>2</sup>, А. Серикбаева<sup>1</sup>,  
М. Абдибаттаева<sup>3</sup>, А. Мырзабекова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НАО «Каспийский университет технологии и инжиниринга имени Ш. Есенова», Казахстан, г. Актау

<sup>2</sup>Университет Вик, Испания, г. Барселона

<sup>3</sup>НАО «Казахский национальный университет имени аль-Фараби», Казахстан, г. Алматы

\*e-mail: fariza\_eco@mail.ru

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И СОЛЕННОСТИ ПОЧВЫ НА СТЕПЕНЬ ДЕСТРУКЦИИ НЕФТИ СВОБОДНЫМИ И ИММОБИЛИЗОВАННЫМИ МИКРООРГАНИЗМАМИ

В связи с ежегодными увеличивающимися объемами добычи и переработки нефти и нефтепродуктов увеличивается вероятность загрязнения экосистем тяжелыми углеводородами. На сегодняшнее время именно биологические методы очистки почвы являются наиболее перспективными методами как с экологической, так и с экономической точки зрения. Основные регионы добычи характеризуются жарким климатом и повышенной соленостью почвы. Известно, эффективность применения микроорганизмов-деструкторов во многом зависит от внешних факторов окружающей среды. Абиотические факторы температуры окружающей среды и солености исходной почвы непосредственно влияют на метаболические процессы бактерий.

Целью данной работы было изучение способности свободных и иммобилизованных на бионосителях микроорганизмов деградировать нефть при разных температурных условиях и при разных концентрациях минеральных солей в почве. Установлено, что с повышением солености степень деструкции снижается. Однако с повышением температуры уровень деструкции сохранялся на том же уровне, что при 5% NaCl. На степень деструкции влияет температурный фактор. Самый высокий результат деструкции показали штаммы, иммобилизованные на рисовой лузге. Тогда как штаммы, иммобилизованные на гречневой шелухе, и свободные клетки при повышении солености и температуры показывают малую степень очистки. Иммобилизация штаммов на твердых органических носителях защищает от внешних воздействий и от колебания температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** биоремедиация, иммобилизация, температура, засоленность, рисовая лузга, шелуха гречихи, микроорганизмы-деструкторы.

F. Khozhanepesova<sup>1\*</sup>, A. Dadrasnia<sup>2</sup>, A. Serikbayeva<sup>1</sup>,  
M. Abdibattayeva<sup>3</sup>, A. Myrzabekova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NAC "Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov", Kazakhstan, Aktau

<sup>2</sup>University of Vic, Spain, Barcelona

<sup>3</sup>NAC «Al-Farabi Kazakh National University», Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: fariza\_eco@mail.ru

## Assessment of the influence of ambient temperature and soil salinity on the degree of destruction of oil by free and immobilized microorganisms

Due to the annual increasing volumes of oil and petroleum products extraction and refining, the probability of ecosystem pollution with heavy hydrocarbons is increasing. At present, it is biological methods of soil purification that are the most promising methods from both an ecological and an economic point of view. The main mining regions are characterized by a hot climate and high salinity of the soil. It is known that the effectiveness of the use of destructive microorganisms largely depends on external environmental factors. Abiotic factors of ambient temperature and salinity of the initial soil directly affect the metabolic processes of bacteria.

The purpose of this work was to study the ability of free and immobilized microorganisms on biological carriers to degrade oil under different temperature conditions and at different concentrations of mineral salts in the soil. It was found that with an increase in salinity, the degree of destruction decreases. However, with an increase in temperature, the level of destruction remained at the same level as at 5% NaCl. The degree of destruction is influenced by the temperature factor. The highest destruction result

was shown by strains immobilized on rice husk. Whereas strains immobilized on buckwheat husks and free cells with increasing salinity and temperature show a low degree of purification. Immobilization of strains on solid organic carriers, protect from external influences and from fluctuations in ambient temperature.

**Key words:** bioremediation, immobilization, temperature, salinity, rice husk, buckwheat husk, destructive microorganisms.

Ф. Хожанпесова<sup>1\*</sup>, А. Дадрасниа<sup>2</sup>, А. Серикбаева<sup>1</sup>,  
М. Абдибаттаева<sup>3</sup>, А. Мырзабекова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>«Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті» КеАҚ, Қазақстан, Ақтау қ.

<sup>2</sup>Вик университеті, Испания, Барселона қ.

<sup>3</sup>«Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: fariza\_eco@mail.ru

### **Қоршаған орта температурасы мен топырақ тұздылығының еркін және иммобилизацияланған микроорганизмдермен мұнайды ыдырату деңгейіне әсерін бағалау**

Мұнай мен мұнай өнімдерін өндіру мен өңдеудің жыл сайынғы көлемінің ұлғаюына байланысты экожүйелердің ауыр көмірсутектермен ластану ықтималдығы артып келеді. Қазіргі уақытта топырақты тазартудың биологиялық әдістері экологиялық және экономикалық тұрғыдан ең перспективалы әдістер болып табылады. Өндірістің негізгі аймақтары ыстық климатпен және топырақтың тұздылығымен сипатталады. Деструктивті микроорганизмдерді қолданудың тиімділігі көбінесе қоршаған ортаның сыртқы факторларына байланысты екені белгілі. Қоршаған орта температурасы және бастапқы топырақтың тұздылығы абиотикалық факторлары бактериялардың метаболикалық процестеріне теріс әсер етеді.

Бұл жұмыстың мақсаты әртүрлі температура жағдайында және топырақтағы минералды тұздардың әртүрлі концентрациясы кезінде еркін және биотасымалдаушыларда иммобилизацияланған микроорганизмдердің мұнайды нашарлату қабілетін зерттеу болды. Тұздылықтың жоғарылауымен жойылу деңгейі төмендейтіні анықталды. Алайда температураның жоғарылауымен жойылу деңгейі 5% NaCl деңгейінде сақталды. Жою дәрежесіне температура факторы әсер етеді. Жоюдың ең жоғары нәтижесі күріш қабығында иммобилизацияланған штамдар көрсетті. Қарақұмық қабығына иммобилизацияланған штамдар және тұздылық пен температураның жоғарылауымен бос жасушалар тазартудың төмен дәрежесін көрсетеді. Қатты органикалық тасымалдағыштардағы штамдардың иммобилизациясы сыртқы әсерлерден және қоршаған орта температурасының ауытқуынан қорғайды.

**Түйін сөздер:** биоремедиация, иммобилизация, температура, тұздылық, күріш қауызы, қарақұмық қауызы, микроорганизмдер-деструкторлар.

## **Введение**

Ежегодное увеличение нефтедобычи приводит к загрязнению обширных территорий как сырой нефтью, так и нефтепродуктами. В результате нарушается естественный обмен веществ, наносится непоправимый ущерб окружающей среде. За последний год объем добычи нефти в Казахстане составляет 87,5 млн тонн, объем переработки – 17,1 млн тонн и объем производства нефтепродуктов – 13,1 млн тонн. Согласно данным, от 1,0 до 18,2 % нефти и нефтепродуктов теряется во время добычи, подготовки к переработке и транспортировки. При добыче основная нефтяная органика выбрасывается в атмосферу, попадает в водные ресурсы 30% и в почву 20%. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу оседают на прибрежных районах и вторично загрязняют воздух и почву.

Сырая нефть состоит из сложных по составу различных алифатических и ароматических соединений. Метод биоремедиации представляет собой привлекательный метод очистки нефтяных загрязнений почвы как мало воздействующий и недорогой метод [1]. Однако успешность применения метода зависит от жизнеспособности введенного углеводородокисляющего штамма. Иммобилизация на биологических носителях является биотехнологическим инструментом для поддержания жизнеспособности штаммов при неблагоприятных условиях окружающей среды и предотвращает потери свободных клеток при биоремедиации. Для дальнейшего управления и использования иммобилизованных микроорганизмов в полевых натуральных работах большое значение имеет деградация нефти при разных условиях окружающей среды, таких как pH, температура, уровень солености почвы. Успеш-

ное использование биоремедиации зависит от данных и параметров, которые задействованы в биоразложении загрязнителей [2, 3].

В данной работе исследовался процесс биоремедиации свободными и иммобилизованными микроорганизмами при различных климатических условиях. Для исследования поведения бактериального сообщества искусственно симулировали разные уровни концентрации солей NaCl и MgSO<sub>4</sub> в почве [1, 4, 5]. Процесс деструкции углеводов имеет непосредственную зависимость от температуры окружающей среды. На окислительную способность микроорганизма влияют многие факторы, как соленость, pH, температура окружающей среды и др. [6, 7]. При разработке критериев биоремедиации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, важную роль играет изучение поведения иммобилизованных штаммов микроорганизмов в широком температурном диапазоне. Согласно данным Lin Z. и соавторов [8], температуры в пределах от +6 °C до 30 °C являются наиболее благоприятными температурными режимами для проведения биологической очистки. Целью данного исследования было изучение способности иммобилизованных микроорганизмов к биоремедиации при различных температурных условиях и при присутствии различных концентраций минеральных солей в почве.

Среди существующих методов очистки нефтезагрязненных грунтов биологический метод является наиболее эффективным и менее энергозатратным методом. Современные методы биоремедиации основаны на применении биологически готовых препаратов, состоящих из специализированных микроорганизмов, способных расщеплять углеводороды в составе нефти как единственный источник пищи [9, 10]. Эффективность штамма микроорганизма зависит от его окисляющих свойств и способности противостоять абиотическим факторам окружающей среды. Qin X. и соавторы [11] провели исследование по разложению нефтяных углеводов и сделали вывод, что степень биодеградации зависит от: 1) оптимальных условий окружающей среды для микроорганизмов; 2) преобладающего типа углеводов в смеси; 3) а также биодоступности углеводов для микроорганизмов. Одним из перспективных направлений исследований является изучение и дальнейшее применение адсорбционной иммобилизации клеткой носителями [12]. Носителями для иммобилизации выступают активные или инертные вещества, которые должны обладать хорошими

сорбционными качествами, а также выступать биостимуляторами деструкции нефти.

Деструкция углеводов в загрязненной почве зависит от четырех основных условий: присутствие микроорганизмов способных к деструкции нефти, определенные условия окружающей среды, способствующие активной деградации, вид углеводородного загрязнения в почве и биодоступность загрязняющих веществ для деструкции микроорганизмами [13]. Потенциал почвенной микробной системы для деградации углеводов зависит от размера популяции микроорганизмов, а также от катаболической активности. Микрофлора почвы включает в себя разнообразное количество бактерий, водоросли, грибы, простейшие и актиномицеты, каждый из них обладает различными уровнями деградации углеводов. Ключевые факторы, влияющие на скорость, с которой микробы разлагают углеводороды, включают доступность загрязняющих веществ для микроорганизмов, обладающих катаболической способностью разлагать их, количество разлагающих микробов, присутствующих в почве, активность разлагающих микроорганизмов и молекулярную структуру загрязнителя [14, 15].

Требуемое количество присутствующих в почве микроорганизмов, необходимых для достижения успешного процесса биодеградации, обычно находится в диапазоне от 104 до 107 КоЕ; при этом этот показатель не должен быть ниже 103 на грамм почвы. Если этот показатель микроорганизмов на грамм почвы составляет менее 103 КоЕ, то это указывает на то, что концентрации органических или неорганических загрязняющих веществ находятся на токсичном уровне [16].

Активность микроорганизмов в почве зависит от климатических условий (температуры и влажности), pH почвы, наличия питательных веществ и т.д. В умеренном и тропическом климате доступность питательных веществ, влаги и кислорода обычно является основным фактором, ограничивающим разложение искусственных соединений [17]. Однако низкая температура является наиболее важным ограничивающим фактором в северных почвах и полярных регионах [18, 19]. Длительность и эффективность разложения органических веществ зависит от функции температуры. Температура напрямую влияет на диапазон биохимических активностей. Большинство бактерий растут в наилучших условиях, когда температура оптимизирована для данного вида. Температура во многих

природных средах меняется в зависимости от сезона, в то время как наилучшей температурой для роста бактерий является диапазон температур 25-40 °С [20]. Температуры, близкие к замерзанию, замедляют или задерживают рост микробов, и микробы находятся в состоянии застоя. Поскольку ферменты не могут проникать из клеток в холодную среду, следовательно, биоремедиация происходит медленно. Наибольшая активность микробов наблюдается в диапазоне температур 20-33 °С, и большинство микробов могут разлагать углеводороды в этом диапазоне температур [17, 18]. Более быстрая каталитическая активность бактериальных ферментов увеличивается с каждым повышением температуры на 10 °С [21]. Оптимальная температура для биодеградации масла составляет 30-40 °С; большинство бактерий, разлагающих нефть, живут в этом температурном диапазоне. Температура влияет на биологическую деградацию нефти, влияя на сочетание физических и химических свойств нефти, скорость метаболизма углеводородов за счет микроорганизмов и состав микробных сообществ. Низкие температуры могут замедлять вязкость масла, а также сублимацию и испарение нефтяных углеводородов, и скорость разложения обычно снижается с понижением температуры [18, 19]. В другом исследовании было заявлено, что температура влияет на биологическую деградацию и скорость, с которой углеводороды метаболизируются микроорганизмами, сочетание физических и химических характеристик нефти, а также состав/структуру микробного сообщества [22]. Также известно, что при низких температурах вязкость и очистка (испарение) токсичных щелочных цепей и их растворимость снижаются. В результате биодеградация углеводородов замедляется [23]. С повышением температуры скорость метаболизма углеводородов достигает максимума, обычно происходящего при температурах в диапазоне от 30 до 40 °С. При более высоких температурах количество токсичных углеводородов увеличивается. Климатические условия и различные сезоны также влияют на популяцию совместимых микроорганизмов [16, 17]. Термофильные условия могут усиливать разложение углеводородов и могут быть легко осуществлены в биореакторах путем нагревания почвы или внесения органических веществ. Следовательно, высокие температуры почвы могут увеличить скорость деградации почвы. Разложение углеводородов происходит медленно при температурах ниже 5 °С [24].

**Таблица 1** – Оптимальная температура разложения углеводородов в различных средах

Среда	Оптимальная температура (°C)
Почвенная среда	30-40
Пресноводная среда	20-30
Морская среда	15-20

## Материалы и методы

В данной работе в качестве сорбентов используются растительные отходы – шелуха гречихи и рисовая лузга. Активными микроорганизмами выступают штаммы микроорганизмов, предоставленные ТОО «Экостандарт»: *Rhodococcus erythreus AT7* и *Dietzia maris 22K*. Данные штаммы были депонированы в Республиканской коллекции микроорганизмов МОН РК под номером В-РКМ-0769 и В-РКМ-0768, соответственно.

Штаммы микроорганизмов культивировали в жидкой среде Ворошиловой-Диановой следующего состава, г/л: NaCl – 10, K<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> – 1, MgSO<sub>4</sub> \* 7H<sub>2</sub>O – 0,2, CaCl<sub>2</sub> – 0,01, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> – 1, с добавлением 1 л дистиллированной воды. Автоклавирование проводили при 1 атм. в течение 15 мин. Обеззараживание сырой нефти и керосина проводили также в автоклаве в герметичных стеклянных ампулах объемом 10 мл, которые были помещены в металлические контейнеры при 1,5 атм. в течение 30 мин. Консорциум был выращен с добавлением автоклавированной сырой нефти (5 мл/л) в качестве единственного источника углерода и энергии в термостате при температуре 28 °С.

Для подготовки носителей 1000 гр. шелухи гречихи (ШГ) и рисовой лузги (РЛ) промывают и помещают в соответствующие стеклянные колбы. Колбы подвергают автоклавированию при 1,5 атм. в течение 30 мин. Иммунизацию проводили на термостатируемых шейкерах на 20 мин. Микрокосмы подготавливали следующим образом: в почву добавляли 5% нефти, а также 3,5 и 10% NaCl. Для отдельно взятых микроскоп вносили дополнительно 0,5 и 1% MgSO<sub>4</sub>. Для проведения процесса биоремедиации в микроскоп добавили штаммы микроорганизмов *Rhodococcus erythreus AT7* и *Dietzia maris 22K*, иммобилизованные на ШГ и РЛ. Микрокосмы были помещены в термостат при температурных диапазонах +4 °С,

+20-22<sup>o</sup>C, +28 <sup>o</sup>C на 7 суток. Количественное потребление нефти определяли гравиметрическим методом [9].

### Результаты исследований и обсуждение

Как уже известно, почвы Западного Казахстана отличаются повышенной соленостью и сухим аридными климатическими условиями [23]. Тип засоления – хлоридно-натриевое и сульфатно-магниевое засоление. Связи с этим изучалась особенность биоремедиации иммобилизованных микроорганизмов на бионосителях

в условиях повышенной солености и при разных температурах окружающей среды. Анализ степени деструкции показал, что все исследуемые варианты опытов показали хорошую деструктивную активность при +4 <sup>o</sup>C, но, как следует заметить, с увеличением солености степень деструкции незначительно снижается (таблица 2). Наибольшее снижение деструкции установлено при свободных клетках микроорганизмов при концентрации соли в 10%. Хорошие результаты деструкции показали штаммы, иммобилизованные на рисовой лузге при +4 <sup>o</sup>C с присутствием 10% натрий хлора.

**Таблица 2** – Результаты деструкции активных штаммов свободных и иммобилизованных бактерий при различных диапазонах температуры и концентраций NaCl

Варианты опытов	Степень деструкции нефти, %		
	3% NaCl	5% NaCl	10% NaCl
	+4 <sup>o</sup> C		
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K	65,6±1,25	53,6±1,28	37,2±0,95
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K + Шелуха гречихи	83,2±0,60	74,17±0,95	68,0±0,85
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K + Рисовая лузга	83,8±0,74	78,2±1,54	64,0±0,89
Контроль	5,6±0,52	4,3±0,27	3,8±0,18
+32 <sup>o</sup> C			
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K	71,6±1,25	69,6±1,28	59,2±0,95
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K + Шелуха гречихи	76,2±0,60	73,17±0,95	75,0±0,85
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K + Рисовая лузга	86,3±0,74	80,2±1,54	83,0±0,89
Контроль	8,9±0,52	7,3±0,27	6,8±0,18
+42 <sup>o</sup> C			
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K	78,6±1,25	48,6±1,28	37,2±0,95
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K + Шелуха гречихи	71,2±0,60	67,17±0,9	54,0±0,85
<i>Rhodococcus erythreus</i> AT7 + <i>Dietzia maris</i> 22K + Рисовая лузга	85,5±0,74	81,3±1,54	78,4±0,89
Контроль	10,7±0,52	8,3±0,27	6,8±0,18

При температуре +32 <sup>o</sup>C одинаковые степени деструкции показали иммобилизованные микроорганизмы 75,5 и 76,8 при наибольшей концентрации NaCl. В сравнительной оценке отмечено, что увеличение солености негативно влияет на деструкцию нефти свободных клеток. Так, при добавлении 10% NaCl деструкция снизилась до 42,2%. При увеличении температуры до +42 <sup>o</sup>C деструкция также уменьшилась при применении свободных клеток на 37,2 и повысилась при использовании иммобилизованных клеток до 78,4%.

Во втором варианте исследования в микроскопы с почвой внесли 0,5 и 1% MgSO<sub>4</sub> и проводили деструкцию при разных температурных условиях. Результаты деструкции приведены в рисунке 1. Показано, что при +42 <sup>o</sup>C наибольший показатель деструкции показали микроорганизмы, иммобилизованные на рисовой лузге при всех диапазонах температур и объемах магний сульфата. Важно отметить, что концентрация соли не повлияла на способность расти и окислять углеводороды. Также, довольно хороший процент окисления показывали штаммы, адсорб-

ционно прикрепленные к шелухе гречихи, при +4 °C, 0,5% MgSO<sub>4</sub> результат составил 62,3%, однако при повышении температуры процент деструкции увеличивался, что свидетельствует о том, что биологические носители являются естественными защитными оболочками микроорганизмов-деструкторов. В целом, согласно

проведенным экспериментам, можно предположить, что данные виды бактерий справляются с деструкцией нефти при разных концентрациях солей, но иммобилизация их на носителях усиливает их деструктивную способность. При этом на деструктивную способность влиял температурный фактор эксперимента.

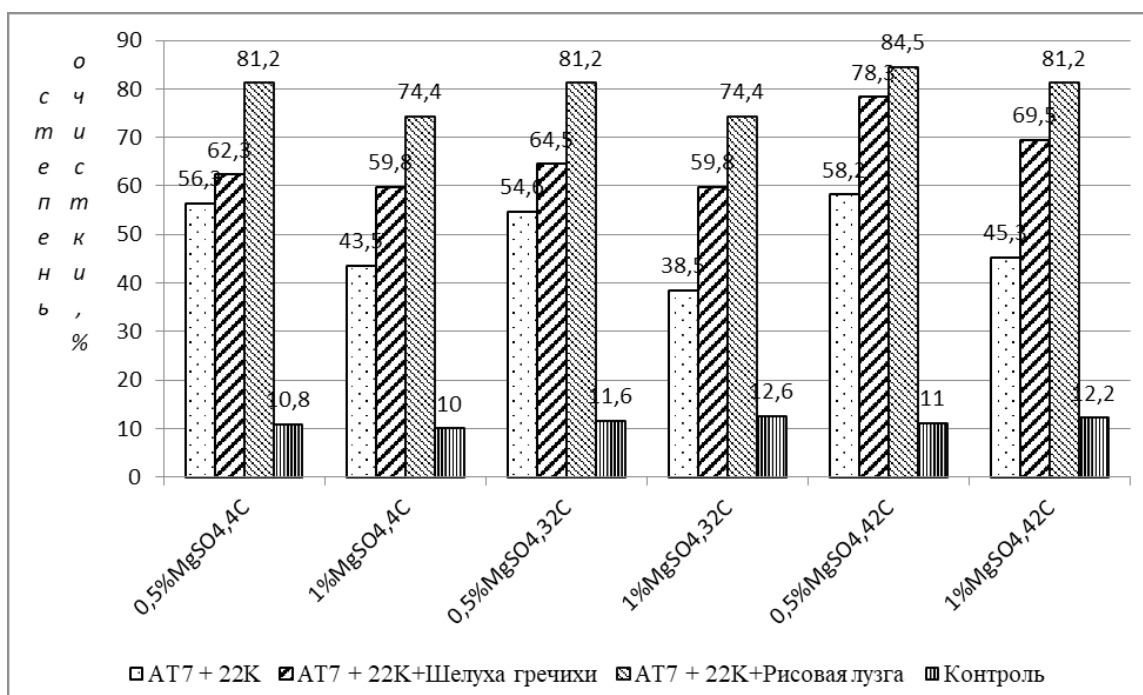


Рисунок 1 – Результаты деструкции активных штаммов свободных и иммобилизованных бактерий при различных диапазонах температуры и концентраций MgSO<sub>4</sub>

## Заключение

Известно, что климат в нефтедобывающих регионах Казахстана резко континентальный, а почвы характеризуются высоким содержанием солей. Так, было установлено, что с повышением солёности степень деструкции снижается. Известно, что наличие солей в почве ухудшает метаболическую активность микробов, тем самым снижая скорость биодеструкции. В частности, было выявлено, что солёность плохо влияет на активность некоторых ферментов, что снижает скорость разложения нефти. Однако с повышением температуры высокий уровень деструкции сохранялся на том же уровне, что и при 5% NaCl. На степень деструкции влиял температурный фактор [19-21]. Увеличение степени окисления микроорганизмами-деструкторами углеводородов может быть

связано с влиянием температуры на структуру клеточных компонентов. Ускорение реакций между белками и липидами зависит от наиболее оптимальной температуры, приводящей к ускорению разложения нефти [23]. Самый высокий результат деструкции показали штаммы, иммобилизованные на рисовой лузге. Тогда как свободные клетки при повышении солёности и температуры показали низкие результаты. Использование биологических агентов в качестве носителей повышает устойчивость микроорганизмов к внешним условиям окружающей среды. Иммобилизация штаммов защищает микроорганизмы от колебаний температуры, а также они являются дополнительными источниками полезных веществ. Использование микробной ассоциации также позволит увеличить биодеградационную способность, поскольку данное сообщество более гибкое, чем использование

отдельных видов [25]. Важную роль играет иммобилизация данных штаммов к носителям при адаптации к внешним условиям среды. Результаты исследования данной работы являются

перспективными для дальнейшего изучения биотехнологического потенциала использования иммобилизованных микроорганизмов на сельскохозяйственных отходах.

### Литература

- 1 Alva V. A., Peyton B. M. Phenol and catechol biodegradation by the haloalkaliphile *Halomonas campisalis*: influence of pH and salinity // *Environmental science & technology*. – 2003. – Т. 37. – №. 19. – С. 4397-4402.
- 2 Antranikian G., Vorgias C. E., Bertoldo C. Extreme environments as a resource for microorganisms and novel biocatalysts // *Marine biotechnology I*. – 2005. – С. 219-262.
- 3 Bhandari S. et al. Microbial enzymes used in bioremediation // *Journal of Chemistry*. – 2021. – Т. 2021.
- 4 Bhattacharya M. et al. Evaluation of a microbial consortium for crude oil spill bioremediation and its potential uses in enhanced oil recovery // *Biocatalysis and agricultural biotechnology*. – 2019. – Т. 18. – С. 101034.
- 5 Dadrasnia A. et al. Bio-enhancement of petroleum hydrocarbon polluted soil using newly isolated bacteria // *Polycyclic Aromatic Compounds*. – 2020. – Т. 40. – №. 2. – С. 484-493.
- 6 Ebadi A. et al. Effective bioremediation of a petroleum-polluted saline soil by a surfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* consortium // *Journal of advanced research*. – 2017. – Т. 8. – №. 6. – С. 627-633.
- 7 Gentili A. R. et al. Bioremediation of crude oil polluted seawater by a hydrocarbon-degrading bacterial strain immobilized on chitin and chitosan flakes // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2006. – Т. 57. – №. 4. – С. 222-228.
- 8 Kumar A. et al. Microbial lipolytic enzymes—promising energy-efficient biocatalysts in bioremediation // *Energy*. – 2020. – Т. 192. – С. 116674.
- 9 Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом. ПНД Ф 16.1.41-04. – 2004.
- 10 Laothamteep, Natthariga, Kallayanee Naloka, and Onruthai Pinyakong. “Bioaugmentation with Zeolite-Immobilized Bacterial Consortium OPK Results in a Bacterial Community Shift and Enhances the Bioremediation of Crude Oil-Polluted Marine Sandy Soil Microcosms.” *Environmental Pollution* 292 (2022): 118309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118309>.
- 11 Lin Z. et al. Novel pathway of acephate degradation by the microbial consortium ZQ01 and its potential for environmental bioremediation // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – Т. 426. – С. 127841.
- 12 Pacwa-Płociniczak M. et al. The effect of bioaugmentation of petroleum-contaminated soil with *Rhodococcus erythropolis* strains on removal of petroleum from soil // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2019. – Т. 169. – С. 615-622.
- 13 Pandey A. K. et al. Effect of bioaugmentation and nitrogen supplementation on composting of paddy straw // *Biodegradation*. – 2009. – Т. 20. – №. 3. – С. 293-306.
- 14 Qin X., Tang J., Li D., Zhang Q. Effect of salinity on the bioremediation of petroleum hydrocarbons in a saline alkaline soil // *Lett. Appl. Microbiol.* – 2012.-Vol.55 (3). – P. 210-2017.
- 15 Scott M. J., Jones M. N. The biodegradation of surfactants in the environment // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*. – 2000. – Т. 1508. – №. 1-2. – С. 235-251.
- 16 Sharma P., Melkania U. Effect of bioaugmentation on hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste // *International journal of hydrogen energy*. – 2018. – Т. 43. – №. 15. – С. 7290-7298.
- 17 Singh S. et al. Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Т. 709. – С. 135895.
- 18 Somu P. et al. Immobilization of enzymes for bioremediation: A future remedial and mitigating strategy // *Environmental Research*. – 2022. – С. 113411.
- 19 Ward D. M., Brock T. D. Hydrocarbon biodegradation in hypersaline environments // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1978. – Т. 35. – №. 2. – С. 353-359.
- 20 Wu M. et al. Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial community composition in petroleum-contaminated loessal soil // *Chemosphere*. – 2019. – Т. 237. – С. 124456.
- 21 Айткельдиева С. А. и др. Оценка биотехнологического потенциала термотолерантных микроорганизмов для деградации нефти // *Вестник КазНУ. Серия экологическая*. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 4-14.
- 22 Баутиста Х. и др. Выделение галотолерантных нефтеокисляющих бактерий-продуцентов биосурфактантов из прибрежного шельфа северной Кубы // *I-й Российский Микробиологический конгресс*. – 2017. – С. 139-140.
- 23 Коршунова Т. Ю. и др. Бактерии рода *Pseudomonas* для очистки окружающей среды от нефтяного загрязнения // *Экобиотех*. – 2020. – Т. 3. – №. 1. – С. 18-32.
- 24 Манкешева О. Т. Экологическое состояние деградированных почв Мангистауской области // *Известия ВУЗов (Кыргызстан)*. – 2014. – №. 1. – С. 22-25.
- 25 Плешакова Е. В., Колесник С. Д. Изучение способности выделенных из буровых шламов микроорганизмов к синтезу биологических поверхностно-активных веществ в условиях повышенной солености среды // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*. – 2020. – №. 1 (29). – С. 100-109.

26 Пляцук Л. Д., Аблеева И. Ю. Использование биодеструкторов для снижения содержания нефтепродуктов в почве // Экология и промышленность. – 2018. – №. 1. – С. 69-75.

27 Соколова Д. Ш., Баженова Ю. Ю. Нефтеокисляющие бактерии, образующие поверхностно-активные вещества в условиях высокой солености // Биотехнология: состояние и перспективы развития. – 2015. – С. 261-262.

### References

1 “Effective Bioremediation of a Petroleum-Polluted Saline Soil by a Surfactant-Producing *Pseudomonas Aeruginosa* Consortium.” 2017. *Journal of Advanced Research* 8 (6): 627–33. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.06.008>.

2 Ajtkel'dieva S. A. «Ocenka biotehnologičeskogo potenciala termotolerantnyh mikroorganizmov dlja degradacii nefti». *Vestnik KazNU. Serija jekologičeskaja* 63, no. 2 (2020): 4-14. ( In Russian)

3 Alva, Victor A., and Brent M. Peyton. 2003. “Phenol and Catechol Biodegradation by the Haloalkaliphile *Halomonas Campisalis*: Influence of PH and Salinity.” *Environmental Science & Technology* 37 (19): 4397–4402. <https://doi.org/10.1021/es0341844>.

4 Antranikian, Garabed, Constantinos E. Vorgias, and Costanzo Bertoldo. 2005. “Extreme Environments as a Resource for Microorganisms and Novel Biocatalysts.” *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 96: 219–62. <https://doi.org/10.1007/b135786>.

5 Bautista H. «Vydelenie galotolerantnyh nefteokisljajushhij bakterij-producentov biosurfaktantov iz pribreznogo shel'fa severnoj Kuby». *Rossijskij Mikrobiologičeskij congress*, no 4 (2017), 139-140. ( In Russian)

6 Bhandari, Sobika, Darbin Kumar Poudel, Rishab Marahatha, Sonika Dawadi, Karan Khadayat, Sitaram Phuyal, Shreesti Shrestha, et al. 2021. “Microbial Enzymes Used in Bioremediation.” Edited by Cláudia G. Silva. *Journal of Chemistry* 2021 (February): 1–17. <https://doi.org/10.1155/2021/8849512>.

7 Bhattacharya, Munna, Sugata Guchhait, Dipa Biswas, and Rituraj Singh. 2019. «Evaluation Of A Microbial Consortium For Crude Oil Spill Bioremediation And Its Potential Uses In Enhanced Oil Recovery». *Biocatalysis And Agricultural Biotechnology* 18: 101034. [doi:10.1016/j.bcab.2019.101034](https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101034).

8 Dadrasnia, Arezoo, Mohammed Maikudi Usman, Kang Tzin Lim, Fairuz Hanani Farahiyah, Nur Syazwani binti Mohd Rodzhan, Sofwah Hayati Abdul Karim, and Salmah Ismail. 2018. “Bio-Enhancement of Petroleum Hydrocarbon Polluted Soil Using Newly Isolated Bacteria.” *Polycyclic Aromatic Compounds* 40 (2): 484–93. <https://doi.org/10.1080/10406638.2018.1454966>.

9 Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii nefteproduktov v probah pochv gravimetricheskim metodom. PND F 16.1.41-04. – 2004.

10 Gentili, Alejandro R., María A. Cubitto, Marcela Ferrero, and María S. Rodríguez. “Bioremediation of Crude Oil Polluted Seawater by a Hydrocarbon-Degrading Bacterial Strain Immobilized on Chitin and Chitosan Flakes.” *International Biodeterioration & Biodegradation* 57, no. 4 (2006): 222–28. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.02.009>.

11 Korshunova, T. Ju., M. D. Bakaeva, E. V. Kuzina, G. F. Rafikova, S. P. Chetverikov, D. V. Chetverikova, and O. N. Loginov. *Prikladnaja biohimija i mikrobiologija* 57, no. 3 (2021), 211-227. [doi:10.31857/s0555109921030089](https://doi.org/10.31857/s0555109921030089).

12 Kumar, Vineet, S. K. Shahi, and Simranjeet Singh. 2018. “Bioremediation: An Eco-Sustainable Approach for Restoration of Contaminated Sites.” *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development*, 115–36. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0053-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0053-0_6).

13 Laothamteep, Natthariga, Kallayanee Naloka, and Onruthai Pinyakong. 2022. “Bioaugmentation with Zeolite-Immobilized Bacterial Consortium OPK Results in a Bacterial Community Shift and Enhances the Bioremediation of Crude Oil-Polluted Marine Sandy Soil Microcosms.” *Environmental Pollution* 292 (January): 118309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118309>.

14 Lin, Ziqiu, Shimei Pang, Zhe Zhou, Xiaozhen Wu, Jiayi Li, Yaohua Huang, Wenping Zhang, et al. 2022. “Novel Pathway of Acephate Degradation by the Microbial Consortium ZQ01 and Its Potential for Environmental Bioremediation.” *Journal of Hazardous Materials* 426 (March): 127841. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127841>.

15 Mankesheva O. 2014. “Jekologičeskoe sostojanie degradirovannyh pochv Mangistauskaj oblasti”. *Izvestija VUZov (Kyrgyzstan)*. 22-25( In Russian).

16 Pacwa-Płociniczak, Magdalena, Joanna Czaplą, Tomasz Płociniczak, and Zofia Piotrowska-Seget. 2019. “The Effect of Bioaugmentation of Petroleum-Contaminated Soil with *Rhodococcus Erythropolis* Strains on Removal of Petroleum from Soil.” *Ecotoxicology and Environmental Safety* 169 (March): 615–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.081>.

17 Pandey, Alok Kumar, Sunita Gaiand, Arif Ali, and Lata Nain. 2008. “Effect of Bioaugmentation and Nitrogen Supplementation on Composting of Paddy Straw.” *Biodegradation* 20 (3): 293–306. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9221-3>.

18 Pleshakova, E. V., and S. D. Kolesnik. 2020. “The study of the ability of micro-organisms isolated from drilling sludge for the synthesis of biological surface-active substances under the conditions of increased salinity medium.” *University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences*, no. 1. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2020-1-10>.

19 Pljacuk L. D., Ableeva I. Ju. 2018. “Ispol'zovanie biodestruktorov dlja snizhenija soderzhanija nefteproduktov v pochve”. *Jekologija i promyshlennost'*.

20 Qin, X., J.C. Tang, D.S. Li, and Q.M. Zhang. 2012. “Effect of Salinity on the Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in a Saline-Alkaline Soil.” *Letters in Applied Microbiology* 55 (3): 210–17. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765x.2012.03280.x>.



- 21 Scott, Matthew J, and Malcolm N Jones. 2000. "The Biodegradation of Surfactants in the Environment." *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes* 1508 (1-2): 235–51. [https://doi.org/10.1016/s0304-4157\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/s0304-4157(00)00013-7).
- 22 Sharma, Preeti, and Uma Melkania. 2018. "Effect of Bioaugmentation on Hydrogen Production from Organic Fraction of Municipal Solid Waste." *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (15): 7290–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.031>.
- 23 Singh, Simranjeet, Vijay Kumar, Shivika Datta, Daljeet Singh Dhanjal, Kankan Sharma, Jastin Samuel, and Joginder Singh. 2020. "Current Advancement and Future Prospect of Biosorbents for Bioremediation." *Science of the Total Environment* 709 (March): 135895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135895>.
- 24 Sokolova D. Sh., Bazhenova Ju. 2015. "Nefteokisljajushhie bakterii, obrazujushhie poverhnostno-aktivnye veshhestva v usloviyah vysokoj solenosti". *Biotehnologija: sostojanie i perspektivy razvitija*. 261-262 ( In Russian).
- 25 Somu, Prathap, Saranya Narayanasamy, Levin Anbu Gomez, Saravanan Rajendran, Yong Rok Lee, and Balakrishnan Deepanraj. 2022. «Immobilization Of Enzymes For Bioremediation: A Future Remedial And Mitigating Strategy». *Environmental Research*, 113411. doi:10.1016/j.envres.2022.113411.
- 26 Ward, David M., and T. D. Brock. 1978. "Hydrocarbon Biodegradation in Hypersaline Environments." *Applied and Environmental Microbiology* 35 (2): 353–59. <https://doi.org/10.1128/aem.35.2.353-359.1978>.
- 27 Wu, Manli, Jialuo Wu, Xiaohui Zhang, and Xiqiong Ye. 2019. "Effect of Bioaugmentation and Biostimulation on Hydrocarbon Degradation and Microbial Community Composition in Petroleum-Contaminated Loessal Soil." *Chemosphere* 237 (December): 124456. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124456>.