

ПУСТЫНЯ ДЭШТЕ-ЛУТ И ЕЕ МИКРОБНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ: НЕДАВНИЕ И ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

© 2022 г. М. С. Ширсалимиан^а, С. М. Мазиди^б, М. А. Амузегар^с *

^аQuality Control Department, Production and Development of Cyclotron Radiopharmaceuticals,
Pars Isotope Company, Karaj, Iran

^бNuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

^сExtremophiles Laboratory, Department of Microbiology, Faculty of Biology and Center of Excellence in Phylogeny of Living
Organisms, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

*e-mail: amozegar@khayam.ut.ac.ir

Поступила в редакцию 21.01.2022 г.

После доработки 28.01.2022 г.

Принята к публикации 30.01.2022 г.

Пустыни покрывают значительную часть земной поверхности. Несмотря на стрессовые условия, в пустынях могут обитать разнообразные микробные популяции, в том числе экстремофилы. Замечательные адаптивные возможности экстремофилов привели к их широкому использованию в биотехнологии и медицине. Изучение микробного разнообразия в аридных местообитаниях может также привести к открытию новых источников биологически активных метаболитов. Пустыня Деште-Лут в восточной части Ирана — одно из самых сухих и жарких мест в мире, где присутствуют уникальные геологические феномены. Настоящий обзор описывает предыдущие работы по изучению микробного разнообразия в пустыне Деште-Лут и их возможное практическое применение.

Ключевые слова: аридные местообитания, пустыня Деште-Лут, микробное разнообразие, экстремофилы

DOI: 10.31857/S0026365622300012

Аридные местообитания находятся в числе самых распространенных биомов на земной суше (свыше 47.2%) (Neilson et al., 2012). Эти местообитания характеризуются низкой доступностью воды, определяемой как соотношение количества осадков (P) и потенциальной эвапотранспирации (ET) (Rao et al., 2016). В полупустынных районах величина P/PET обычно составляет 0.2–0.5, а в пустынных 0.2–0.05. В экстремально аридных зонах значения P/PET ниже 0.05 при среднегодовом количестве осадков менее 25 мм (Azua-Bustos et al., 2012; Wierzchos et al., 2012; Rao et al., 2016).

Помимо недостатка воды, для аридных местообитаний (пустынь) часто характерны и другие виды экстремальных условий, включая перепады температур, высокий уровень инсоляции, низкая концентрация органического вещества и высокая соленость (Chanal et al., 2006). Однако микробная жизнь сумела адаптироваться к экстремальным условиям пустынь, и микроорганизмы были обнаружены в различных экологических нишах, включая литобионтные местообитания (Wierzchos et al., 2012), почву и поверхностные пески (Rainey et al., 2005; Chanal et al., 2006; Drees et al., 2006;

Neilson et al., 2012; Rao et al., 2016), а также галитные эвапориты (Shirsalimian et al., 2017).

Экстремофилы — это организмы, адаптированные к условиям экстремальных местообитаний, враждебным или даже смертельным для других форм жизни. Их можно подразделить на две категории: собственно экстремофилы, для роста которых требуется один или несколько экстремальных факторов, и экстремотолерантные организмы, способные переносить воздействие экстремальных факторов, но требующие “нормальных” условий для оптимального роста. Разнообразные экстремофилы принадлежат ко всем трем доменам: *Bacteria*, *Archaea* и *Eukarya*; последние в основном представлены микроорганизмами (Orellana et al., 2018). Жаркие сухие пустыни находятся в числе экосистем, откуда часто выделяют экстремофилы, включая ксерофилы, термофилы, галофилы и микроорганизмы, устойчивые к ионизирующей радиации.

Большая часть современных исследований по микробиологии аридных местообитаний проводилась в пустыне Атакама (север Чили), старейшей и самой сухой пустыне в мире (Azua-Bustos et al., 2012). Кроме того, в нескольких обзорах описаны

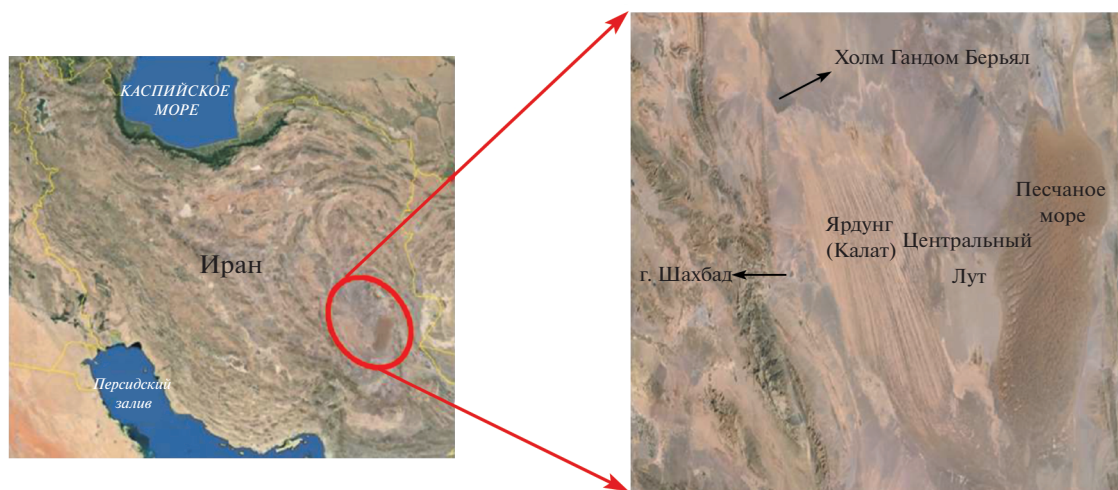


Рис. 1. Пустыня Деште-Лут (обозначена овалом) и окружающие области.

микробное разнообразие и абиотические условия других пустынь (Rainey et al., 2005; Chanal et al., 2006; Rao et al., 2016).

Пустынные регионы Ирана занимают приблизительно 0.33 млн квадратных километров, т.е. 20% от общей площади страны (Emadodin et al., 2019). Две главные пустыни Ирана – это Деште-Кевир и Деште-Лут. Пустыня Деште-Лут имеет площадь примерно 51 800 км² и известна исключительной сухостью: менее 30 мм осадков в год (Azarderakhsh et al., 2019; Lyons et al., 2020). По классификации Worldwide Bioclimatic Classification System (WBCS), пустыня Деште-Лут принадлежит к числу тропических гиперпустынных (tropical hyperdesertic) местообитаний – самых сухих и жарких в мире (Lyons et al., 2020). В последние годы несколько работ было посвящено изучению микроорганизмов, адаптированных к экстремальным условиям пустыни Деште-Лут. Большое внимание в этот период уделялось и изучению биоразнообразия животных в пустыне Деште-Лут (Zamani, Marusik, 2018; Schwentner et al., 2020).

Цель данного обзора – описать разнообразие экстремофильных микроорганизмов в этой пустыне и сравнить его с микроорганизмами, выделенными из иных гипераридных местообитаний.

ГЕОЛОГИЯ ПУСТЫНИ ДЕШТЕ-ЛУТ

Пустыня Деште-Лут расположена между 28° и 32° с.ш. на юго-востоке Ирана. Название “Деште-Лут” означает “голый, лишенный растительности”. Она граничит с провинциями Южный Хорасан, Систан и Белуджистан и Керман (рис. 1). В пустыне Деште-Лут находятся замечательные пустынные геоморфологические феномены (Yazdi et al., 2014). В 2016 г. пустыня Деште-Лут была включена в список Всемирного наследия

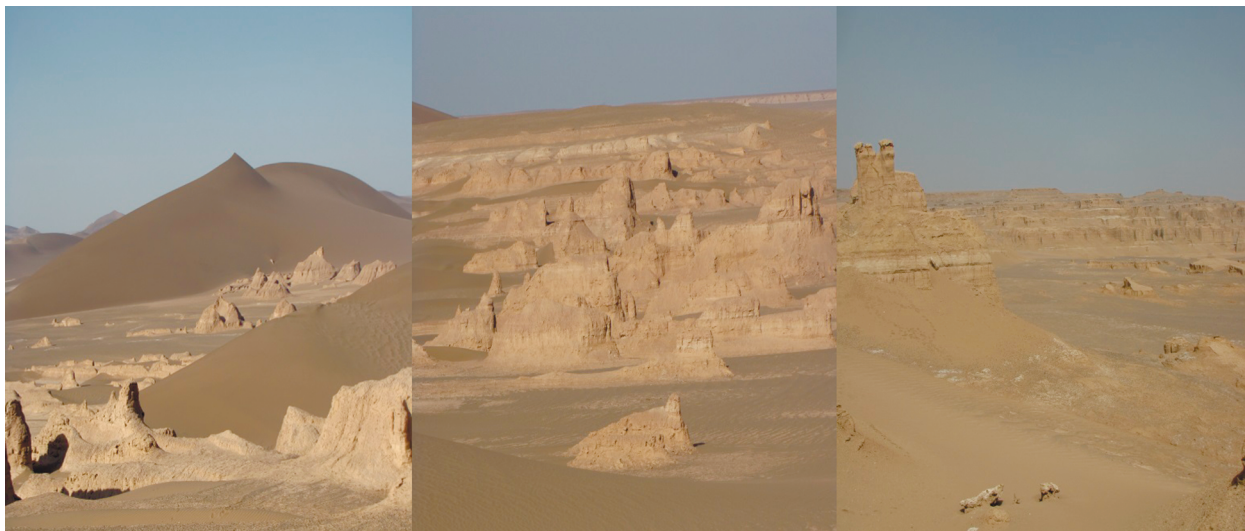
ЮНЕСКО в качестве первого природного объекта в Иране.

Геологические феномены

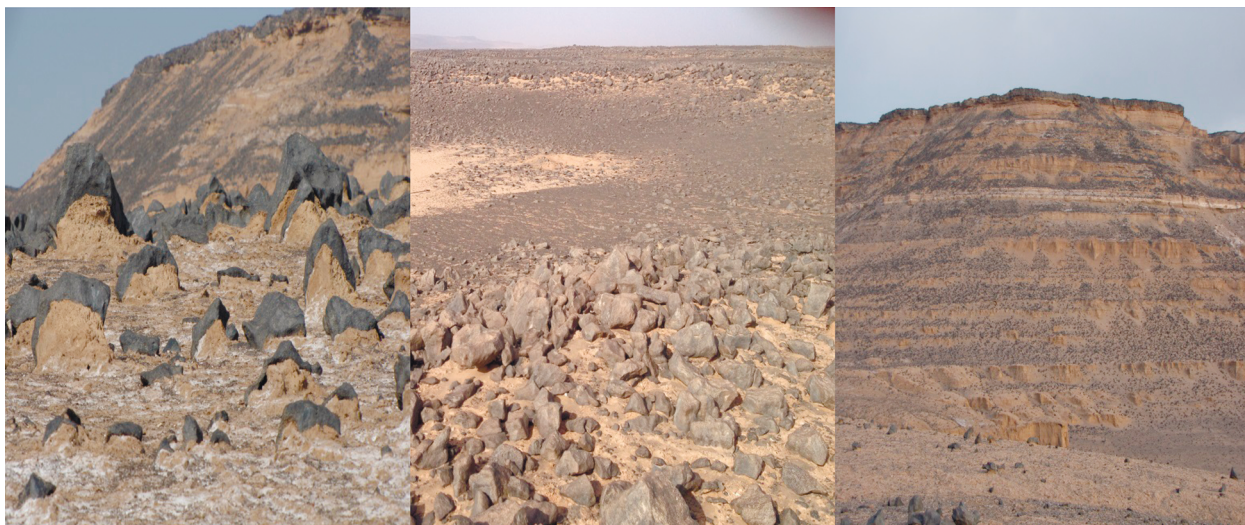
Центральная часть пустыни Деште-Лут расположена между Песчаным морем (Rig-e Yalan) на востоке и ярдангами (Калат) на западе. В этом районе находится нижняя точка страны (185 м выше уровня моря). Самые большие ярданги в мире расположены в западной части центрального Лута, в 43 км от г. Шахбад в провинции Керман (рис. 2). Ярданги представляют собой крупные образования из песчаника, возникающие в засушливых местностях в результате ветровой и водной эрозии. Большую роль в их образовании играют сильные местные ветры восточной части Ирана (120-дневный ветер). Издали Калат напоминают чужую планету. Набхи – это покрытые растительностью выпуклые песчаные дюны, образующиеся при захвате песка корнями деревьев. Они встречаются на западном краю пустыни Деште-Лут, где уровень подземных вод высок или достаточно влаги, чтобы поддерживать рост растений. В пустыне Деште-Лут набхи достигают высоты до 10 м и, возможно, являются крупнейшими в мире. Кроме того, одна из крупнейших песчаных дюн находится в восточной части Центрального Лута (Yazdi et al., 2014).

Покрытое лавой плато Гандом Берьян (Gandom Berzayeh) – это большой черный холм площадью около 200 км², расположенный в 80 км к северу от города Шахбад. Скалы плато происходят из окружающих его вулканических кратеров. Черный цвет пород приводит к тому, что плато Гандом Берьян поглощает значительное количество солнечного излучения (Shirsalimian et al., 2018). В результате чего температура варьирует от 65°C в

(a)



(б)



(в)



Рис. 2. Геологические зоны пустыни Деште-Лут Desert: Калаат, западная часть центрального Лута (а); плато Гандом Берьян, черный холм, покрытый лавой (б); Руд-э Шур, соленая река в пустыне Деште-Лут (в). Фотографии М.А. Amoozegar и М.С. Shirsalimian.

тени до примерно 100°C на черных вулканических породах в летнее время (Yazdi et al., 2014). Постоянная соленая река с местным названием Руд-э Шур (Rud-e Shoog) протекает в сердце пустыни Деште-Лут. Эта река берет начало на северо-западе региона, пересекает окраины Калата и заканчивается в солевой шахте в Шахбаде (Yazdi et al., 2014; Lyons et al., 2020) (рис. 2).

Самое жаркое место на Земле

Пустыня Деште-Лут — один из кандидатов на звание “самого жаркого места на Земле”. По данным температуры земной поверхности (LST), полученным с помощью спектрорадиометра умеренного разрешения (MODIS), установленного на спутнике “Аква” (НАСА), в 2005 г. поверхность некоторых участков пустыни Деште-Лут к востоку от Калата имела температуру свыше 70°C (Yazdi et al., 2014; Azarderakhsh et al., 2019; Lyons et al., 2020). Более позднее исследование (2018 г.) показало еще более высокие значения LST с максимумом 80.83°C (Azarderakhsh et al., 2019).

ЭКСТРЕМОФИЛЫ ПУСТЫНИ ДЕШТЕ-ЛУТ

Плато Гандом Берьян

Плато Гандом Берьян — лишь одно из числа геологических феноменов пустыни Деште-Лут. Физико-химические свойства почвы плато Гандом Берьян были описаны ранее. Общее содержание органического углерода (ТОС) было очень низко (1430 мкг/г), то есть условия в этой области были олиготрофными (Shirsalimian et al., 2018). Значения ТОС для образцов из других пустынь — Атакама (Чили), Мохаве (США) и Сахара (Африка) — составляли соответственно 560–765, 7000 и 1700 мкг/г (Lester et al., 2007).

При исследовании разнообразия культивируемых радиационно-устойчивых бактерий использовали устойчивость к обезвоживанию в качестве селективного фактора. На основании анализа последовательностей их 16S рРНК генов, два изолята неспорообразующих пигментированных бактерий, выделенные из грунта и поверхностных песков плато Гандом Берьян, были идентифицированы как *Modestobacter muralis* (штамм А2) и *Maritalea mobilis* (штамм В9) (Shirsalimian et al., 2018). Род *Modestobacter* принадлежит к семейству *Geodermatophilaceae*, члены которого способны колонизировать такие экологические ниши, как почвы Антарктиды и жарких пустынь, высокогорные почвы и породы, и исторические памятники (Busarakam et al., 2016). Уровень устойчивости к обезвоживанию (до 8 нед. в эксикаторе с силикагелем) для *Modestobacter* sp. А2 (23% выживания) был даже выше, чем для *Deinococcus radiodurans* R1, классического организма, устойчивого к обезвоживанию (15% выживания).

Сравнение устойчивости к обезвоживанию у штамма А2 и штамма *Modestobacter multiseptatus* ВС501, изолированного из Каррарской пещеры в Италии (Gtari et al., 2012), показало значительно большую устойчивость штамма А2 в сравнении со штаммом ВС501 (10% выживания). *Modestobacter* sp. А2 был умеренно устойчив к γ -излучению, со значениями D_{10} от 3 до 4 кГр. Значение D_{10} для микроорганизмов определяется как доза радиации, вызывающая 90% снижение числа колониеобразующих единиц. Бактерии с $D_{10} > 1$ кГр считаются радиационно-устойчивыми (Guesmi et al., 2020). Штамм *Maritalea* sp. В9 сохранял жизнеспособность после 8 нед. обезвоживания (0.15% выживания) и был умеренно устойчив к γ -излучению, со значениями D_{10} от 2 до 3 кГр. Это было первое сообщение об устойчивости члена рода *Maritalea* (семейство *Hyphomicrobiaceae*) к γ -излучению и обезвоживанию (Shirsalimian et al., 2018).

Еще один бактериальный штамм, устойчивый к γ -излучению и обезвоживанию (А10), был выделен в работе Shirsalimian et al. (2016). Анализ последовательностей 16S рРНК гена штамма А10 показал, что его ближайшим родственником является *Kocuria polaris*. Этот штамм сохранял жизнеспособность (0.7% выживших клеток) после 4 нед. обезвоживания. Величина D_{10} для *Kocuria* sp. А10 составляла 4.5–5 кГр. При γ -облучении (2 кГр) уровень устойчивости штамма *Kocuria* sp. А10 был в 5 раз выше, чем у штамма *Kocuria* sp. ASB 107, выделенного из радиоактивного источника Аб-э Ссах в Рамсаре, Мазандаран, Иран (Asgarani et al., 2012; Shirsalimian et al., 2016). Эквивалентная доза в окрестностях источника составляла примерно 13.48 мкЗв ч⁻¹ (Dabbagh et al., 2007). Сравнение уровней радиационной устойчивости двух штаммов *Kocuria* указывает на то, что условия в пустыне Деште-Лут в большей мере способствовали эволюции радиационно-устойчивых бактерий, чем условия радиоактивного источника Аб-э Ссах. Иными словами, эти результаты можно рассматривать как очередное подтверждение “гипотезы адаптации к обезвоживанию”. Она предполагает, что обезвоживание создает эволюционное давление, благоприятствующее развитию устойчивого к радиации фенотипа, поскольку пустыни встречаются на поверхности Земли чаще, чем местообитания с повышенным уровнем ионизирующей радиации (Mattimore, Battista, 1996; Kottmann et al., 2005; Slade, Radman, 2011). Как ионизирующее излучение, так и обезвоживание приводят к образованию активных форм кислорода (АФК), что вызывает оксидативный стресс. Ключевую роль в ответе на оксидативный стресс играют разнообразные защитные механизмы, включая эффективные системы репарации ДНК, пигменты (например, каротиноиды), антиоксидантные ферменты (каталаза, суперок-

Таблица 1. Устойчивость к γ -излучению и обезвоживанию для штаммов *Kocuria*, выделенных из пустынь

Микроорганизм	Устойчивость к γ -излучению	Устойчивость к обезвоживанию	Источник	Ссылка
<i>Kocuria polaris</i> A10	$D_{10} = 4.5-5$ кГр	<1% выживания*	Песчаные дюны пустыни Деште-Лут, Иран	Shirsalimian et al., 2016
<i>Kocuria</i> sp.	Выделен из почвы после облучения 5–9 кГр	Н.о.	Почва пустыни Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Kocuria rhizophila</i> PT10	$D_{10} = 2.9$ кГр	77.3% выживания**	Облученные корни ксерофита <i>Panicum turgidum</i> , Сахара, Тунис	Guesmi et al., 2020

Н.о. – не определяли.

* 4 нед. в эксикаторе с силикагелем.

** 4 нед. в эксикаторе с безводным CaSO_4 .

сид дисмутаза, пероксидазы) и Mn^{2+} -содержащие антиоксидантные комплексы (Slade, Radman, 2011). Профили устойчивости штаммов *Kocuria* выделенных из пустынных субстратов приведены в табл. 1.

В другой работе сообщается о выделении двух устойчивых к радиации штаммов *Deinococcus* spp., (LD4 и LD5) из образца почвы, отобранного в пустыне Деште-Лут. Эти штаммы были устойчивы к γ -излучению (>15 кГр). Значения D_{10} для штаммов LD4 и LD5 были, соответственно, 7.15 и 5.94 кГр. Оба штамма были также устойчивы к УФ излучению в дозах >600 Дж м^{-2} (Mohseni et al., 2014). Эти значения сопоставимы с описанными для других пустынных штаммов *Deinococcus* (табл. 2).

Биотехнологическое использование термофильных микроорганизмов, растущих при температурах выше 45°C, привлекает в наше время все большее внимание. Преимущества промышленного применения термофилов, продуцирующих термостабильные внеклеточные ферменты, включают меньший риск микробного загрязнения, лучшую растворимость субстратов при повышенных температурах и более высокие массообменные характеристики. Пустыни и подобные аридные экосистемы считаются местообитаниями, благоприятствующими выделению термофильных микроорганизмов (Orellana et al., 2018). Shahsavari et al. (2021) выделили термофильный штамм *Bacillus licheniformis* на плато Гандом Берьян и охарактеризовали его. Эта бактерия проявляла целлюлолитическую, амилолитическую, липолитическую, протеолитическую и аспарагинолитическую активность при 55°C. Максимальная продукция целлюлазы (17.5 ед./мл) наблюдалась при pH 7–8 на агаре с 1% карбоксиметил целлюлозы после 72 ч культивирования. Максимальная амилолитическая активность (4 ед./мл) наблюдалась в щелочных условиях (pH 9) спустя 72 ч на агаризованной среде с крахмалом. Исследование липолитической активности при различ-

ных значениях pH выявило оптимум при pH 8.5 (19 ед./мл). Наибольшая активность протеиназы (117 ед./мл) была отмечена при pH 10 после 48 ч культивирования на молочном агаре. Было показано, что оптимальная продукция аспарагиназы происходила при pH 8 после 72 ч культивирования (4 ед./мл) (Shahsavari et al., 2021).

Руд-э Шур

Галофилы – микроорганизмы, адаптированные к существованию при высоких концентрациях соли. Галофилы подразделяются на группы в соответствии с оптимальными концентрациями соли для их роста. Почти все экстремальные галофилы принадлежат к галофильным археям (галоархеям) из семейства *Halobacteriaceae*; их наилучший рост происходит при концентрациях NaCl от 2.5 до 5.2 М (насыщение) (Ogen, 2008). Гиперсоленые местообитания типичны для аридных условий. Кроме высокой концентрации соли, на их биоразнообразие влияют такие факторы, как высокая либо низкая температура, осмотическое давление, низкая доступность питательных веществ, ограниченный доступ кислорода, циклы обезвоживания/регидратации и солнечное излучение (Ventosa, 2006).

Хотя биоразнообразие микробных сообществ в соленых экосистемах Ирана изучено сравнительно хорошо (Safarpour et al., 2018), первое исследование микроорганизмов Руд-э Шур с использованием культуральных методов было выполнено Shirsalimian et al. в 2017 г. Общая соленость в Руд-э Шур составляет 134.3 г л^{-1} , что в 4 раза выше солености морской воды. Основными ионами являются Na^+ и Cl^- (Shirsalimian et al., 2017). Экстремальные галофилы были выделены из засоленной почвы и кристаллов соли с использованием среды, содержащей 23% соли. Было получено 219 колоний галофильных архей. Применение устойчивости к

Таблица 2. Устойчивость к γ - и УФ-излучению у штаммов *Deinococcus*, выделенных из пустынь мира

Микроорганизм	Устойчивость к γ -излучению	Устойчивость к УФ излучению	Пустыня	Ссылка
<i>Deinococcus</i> sp. LD4	> 15 кГр ($D_{10} = 7.15$ кГр)	> 600 Дж м ⁻²	Деште-Лут	Mohseni et al., 2014
<i>Deinococcus</i> sp. LD5	> 15 кГр ($D_{10} = 5.94$ кГр)	> 600 Дж м ⁻²	Деште-Лут	Mohseni et al., 2014
<i>Deinococcus hohokamensis</i> KR-40 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus navajonensis</i> KR-114 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus arachensis</i> KR-36 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus hopiensis</i> KR-140 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus somorensis</i> KR-87 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus yavapaiensis</i> KR-236 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus paragonensis</i> KR-241 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus pimensis</i> KR-235 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus maricopenensis</i> LB-34 ^T	> 10 кГр	Н.о.	Сонора, США	Rainey et al., 2005
<i>Deinococcus gobiensis</i> I-0 ^T	> 15 кГр	> 600 Дж м ⁻²	Гоби, КНР	Yuan et al., 2009
<i>Deinococcus deserti</i> VCD115 ^T	23.0% выживших при 7.5 кГр	73.0% выживания при 250 Дж м ⁻² > 1.0% выживания при 750 Дж м ⁻²	Сахара, Марокко и Тунис	de Groot et al., 2005
<i>Deinococcus deserti</i> VCD117	6.0% выживших при 7.5 кГр	11.0% выживания при 250 Дж м ⁻²	Сахара, Марокко и Тунис	de Groot et al., 2005
<i>Deinococcus</i> sp. VCT102	$D_{10} = 11$ кГр	Н.о.	Татавин, юг Туниса	Chanal et al., 2006
<i>Deinococcus</i> sp. VCT111	$D_{10} = 12$ кГр	Н.о.	Татавин, юг Туниса	Chanal et al., 2006
<i>Deinococcus</i> sp. RCML-5	$D_{10} = 7$ кГр	Н.о.	Такла-макан, КНР	Yu et al., 2015
<i>Deinococcus taklimakanensis</i> X-121 ^T	7.0% выживших при 10 кГр	2.3% выживания при 460 Дж м ⁻²	Такла-макан, КНР	Liu et al., 2017
<i>Deinococcus peraridilitoris</i> KR-200 ^T	> 10 кГр	Н.о.	К северу от Антофагасты, Чили	Rainey et al., 2007
<i>Deinococcus xinjiangensis</i> X-82 ^T	1–0.5% выживания при 5 кГр	1.7% выживания при 810 Дж м ⁻²	Такла-макан, КНР	Peng et al., 2009
<i>Deinococcus saudiensis</i> YIM F-302 ^T	44.0% выживших при 5 кГр	33.5% выживания при 5 Дж м ⁻²	Янбу-эль-Бахр, Саудовская Аравия	Hussain et al., 2016
<i>Deinococcus saudiensis</i> YIM F-235	14.0% выживших при 5 кГр	25.6% выживания при 5 Дж м ⁻²	Янбу-эль-Бахр, Саудовская Аравия	Hussain et al., 2016

Н.о. – не определяли.

обезвоживанию для скрининга устойчивых к радиации штаммов выявило, что 11 изолятов сохраняли жизнеспособность после 35 сут в эксикаторе с силикагелем. Три из них, принадлежавшие к видам *Haloterrigena jeotgali* (штамм MS2), *Natrialba aegyptia* (штамм MS17) и *Natrinema pallidum* (штамм MS50), выживали после 8 нед. в эксикаторе с силикагелем и были устойчивы к γ -излучению (D_{10} от 2 до 3 кГр). Штамм MS17 выдерживал до 6 кГр, а штаммы MS2 и MS50 теряли жизнеспособность после дозы облучения 5 или 6 кГр. Это ниже, чем значение D_{10} , известное для хорошо изученной галофильной археи *Halobacterium* sp. NRC-1 (5 кГр). В отличие от изолятов галофильных архей из Руд-э Шур, выживаемость штамма *Halobacterium* sp. NRC-1 медленно снижалась (до 25%) после 20 сут в печи с 36 г высушивающего средства Drierite (Kottemann et al., 2005).

Относительно обезвоживания было установлено, что галофильные археи лучше адаптированы к периодическому и продолжительному обезвоживанию, чем *Deinococcus radiodurans*: после 7 сут в эксикаторе выживаемость последнего резко снизилась (<10%), в то время как у всех трех штаммов архей выживаемость почти не менялась даже в течение следующих 49 сут. Члены семейства *Halobacteriaceae* или их 16S рРНК гены часто выявлялись в древних соляных залежах возрастом в миллионы лет (Mattimore, Battista, 1996; Schubert et al., 2010; Stan-Lotter, Fendrihan, 2015). Клетки галофильных архей, выявленные во включениях рассола в кристаллах соли, были адаптированы к экстремальным условиям: очень высокая ионная сила, обезвоживание и недостаток питательных веществ (Stan-Lotter, Fendrihan, 2015). Включения рассола в гиперсоленых местообитаниях создают защитный барьер против γ -излучения (Kottemann et al., 2005). Важно отметить, что каждое открывание и закрывание эксикатора запускает очередной цикл обезвоживания/регидратации (Mattimore, Battista, 1996). Периодическое испарение воды с последующим отложением солей подвергает галофильные микроорганизмы обезвоживанию и вызывает повреждения ДНК (Kottemann et al., 2005). Ответственность за устойчивость *Halobacterium* sp. NRC-1 к окислительному стрессу, вызванному обезвоживанием или γ -излучением, возлагали на мембранные пигменты (бактериоруберин), высокую внутриклеточную концентрацию KCl и эффективные системы репарации ДНК (Shahmohammadi et al., 1998; Kottemann et al., 2005).

В ходе аналогичного исследования разнообразные галофильные сообщества были выделены из пустыни Саганд на северо-западе пустыни Деште-Лут. Анализ последовательностей 16S рРНК генов выявил принадлежность изолятов галофильных архей к родам *Natrinema* и *Haloarcula*; га-

лофильные бактерии принадлежали к родам *Halomonas*, *Bacillus*, *Staphylococcus* и *Gracilibacillus*.

Таким образом, пустыня Деште-Лут может считаться идеальным местом для изучения полиэкстремофилов (Salari et al., 2020).

ПУСТЫННЫЕ ПОЧВЫ КАК ИСТОЧНИК БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МИКРОБНЫХ МЕТАБОЛИТОВ

Поиск новых биологически активных соединений привлекает все возрастающий интерес. Аридные экосистемы относятся к предпочтительным для выделения новых микроорганизмов, продуцирующих природные метаболиты. Одной из наиболее многочисленных групп микроорганизмов в почвах пустынь являются *Actinobacteria*, производящие 45% всех биологически активных метаболитов (Ouchari et al., 2019).

В нашей работе (Mazkour et al., 2017) актиномицеты были выделены из трех локаций плато Гандом Берьян; для семи штаммов была изучена антимикробная активность. Бесклеточные супернатанты культур этих штаммов оказались неэффективны против исследованных патогенных бактерий (*Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* и *Staphylococcus aureus*), а их максимальное ингибирующее действие на *Bacillus cereus*, определенное методом диффузии в агаре, составляло $33.1 \pm 1.19\%$ (Mazkour et al., 2017).

Fatahi-Bafghi et al. (2019) исследовали пустыню Деште-Лут в целях поиска новых актиномицетов — продуцентов антибиотиков. Из 24 локаций были выделены 42 штамма актиномицетов с использованием различных сред: агар для выделения актиномицетов, крахмал-казеиновый агар, мясо-пептонный агар и среда Сабура с декстрозой. Из 42 изолятов, 8 были идентифицированы с помощью секвенирования 16S рРНК генов как члены родов *Micromonospora* (5 изолятов), *Streptomyces* (1 изолят), *Saccharothrix* (1 изолят) и *Cellulomonas* (1 изолят). Эти изоляты проявляли активность в отношении антибиотикоустойчивых микроорганизмов, включая *Enterococcus faecium*, *Acinetobacter baumannii*, *Klebsiella pneumoniae* и метициллин-устойчивого *Staphylococcus aureus*. Авторы заключили, что в пустыне Деште-Лут, с ее огромными неисследованными территориями, возможно выделение разнообразных актиномицетов, продуцирующих антибиотики (Fatahi-Bafghi et al., 2019).

В ходе исследования соленых и гиперсоленых регионов Ирана (Abbasi, Emtiazi, 2020), термостабильный галоген был обнаружен у нового штамма *Halarchaeum acidiphilum*, выделенного в пустыне Деште-Лут. Очищенный препарат был эффективен против некоторых грамположительных (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Streptococcus mutans*) и грамтрицательных бактерий (*Pseudo-*

monas aeruginosa, *Escherichia coli*), а также против некоторых архей (*Halobacterium salinarium*). Галоцин сохранял антимикробную активность после инкубации при высокой температуре (до 100°C в течение 15 мин) и в кислой среде (pH 2.8 в течение 2 ч) (Abbasi, Emtiazi, 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия в пустыне Атакама, самом сухом месте на Земле, были поставлены многочисленные эксперименты. Самые сухие участки пустыни Атакама получают <2 мм осадков в год. Несмотря на эти экстремальные условия, было показано существование там многих различных типов микробной жизни (Azua-Bustos et al., 2012; Neilson et al., 2012). Полная геологических чудес пустыня Деште-Лут также считается одним из самых сухих и жарких мест в мире (Yazdi et al., 2014; Azarderakhsh et al., 2019). Исследования пустынных микроорганизмов, потенциальных источников новых метаболитов и генов создает великолепные возможности в биоремедиации, терапии рака и астробиологии (Slade, Radman, 2011). Разнообразие микроорганизмов в пустыне Деште-Лут до сих пор изучено недостаточно. Ее экстремальные климатические условия и труднодоступность делают пустыню Деште-Лут самым неизученным регионом Ирана. Исследование биоразнообразия, включая выделение и идентификацию новых микроорганизмов из разнообразных местообитаний, может существенно расширить генетические ресурсы для будущих работ.

Окислительный стресс возникает из-за дисбаланса между продукцией АФК и антиоксидантными защитными механизмами. Оксидативный стресс играет важную роль в развитии рака, возрастных заболеваний и в старении. Поэтому стратегии, направленные на снижение оксидативного стресса или усиление антиоксидантных защитных механизмов, могут помочь в борьбе со старением и раком (Slade, Radman, 2011). Известно, что комплексы двухвалентных ионов марганца (Mn^{2+}) и некоторыми распространенными клеточными метаболитами (например, ортофосфатом, пептидами и нуклеотидами) являются важнейшими радиозащитными компонентами в клетках *Deinococcus radiodurans*. Комплексы марганца, действующие поглотители АФК, вероятно, защищают белки от оксидативного стресса, вызванного радиацией (Daly et al., 2010). Поэтому предполагается, что, манипулируя метаболизмом с целью повысить накопление Mn^{2+} комплексов, можно развить устойчивость к радиации в животных клетках (Slade, Radman, 2011). Большая работа была проделана по идентификации антиоксидантных агентов в клетках *Deinococcus radiodurans*. Грубый экстракт вторичных метаболитов этого организма

содержал разнообразные биологически активные антиоксиданты, способные к очистке от свободных радикалов (Maqbool et al., 2019, 2020). Недавно была описана противораковая активность дейноксантина, уникального каротиноида, выделенного из *Deinococcus radiodurans* и вызывающего апоптоз в трех линиях раковых клеток человека (HepG2, PC-3 и HT-29) (Choi et al., 2014). Недавние работы обнаружили роль внеклеточного полисахарида *Deinococcus* (DeinoPol) в реакции на оксидативный стресс путем обезвреживания АФК (Lin et al., 2020). Поэтому использование антиоксидантов из радиостойчивых микроорганизмов может представлять интерес для профилактики и терапии рака.

В промышленной биотехнологии уделяется особое внимание *Deinococcus radiodurans* в связи с его замечательным потенциалом в биоремедиации (Gerber et al., 2015). Штаммы *Deinococcus radiodurans*, полученные методами геной инженерии, стали идеальными кандидатами для биоремедиации радиоактивных местообитаний, загрязненных тяжелыми металлами (Brim et al., 2006; Misra et al., 2012; Shukla, Rao, 2017), ураном и прочими радионуклидами (Manobala et al., 2019) и токсичными органическими веществами, например, толуолом (Lange et al., 1998).

Галофильные и галотолерантные микроорганизмы находят применение в различных отраслях биотехнологии. В настоящее время галофилы успешно используются в таких процессах, как производство бактериородопсина, β -каротина и эктоина. Их также традиционно используют в различных регионах мира для производства разнообразных пищевых продуктов. Другие потенциальные области применения галофилов включают производство биополимеров (биосурфактантов и экзополисахаридов) и ферментов, биотоплива, а также биодеграцию ароматических поллютантов в соленых местообитаниях (Oren, 2010).

Если на Марсе существует либо существовала жизнь, галофильные археи – это те организмы, которые могли бы расти/выживать в таких условиях. Существуют свидетельства существования соли и жидких рассолов на Марсе (Fendrihan et al., 2006; Oren, 2014). Класс *Halobacteria* привлекал внимание астробиологов в течение нескольких последних десятилетий в связи с их замечательными свойствами, включая несколько видов анаэробного метаболизма (Oren, 2014), выживание в условиях космоса (Kottemann et al., 2005; Oren, 2014; Leuko et al., 2015), при обезвоживании (Kottemann et al., 2005; Stan-Lotter, Fendrihan, 2015) и низких температурах (Oren, 2014), а также способность сохраняться в покоящемся состоянии внутри соляных кристаллов (Fendrihan et al., 2006; Oren, 2014; Stan-Lotter, Fendrihan, 2015).

Хотя в пустыне Деште-Лут было проведено несколько работ, детальное изучение микробного разнообразия в этом регионе требует дальнейших исследований. В настоящем обзоре показано, что микроорганизмы, выделенные из этой пустыни, могут быть перспективны для практического использования. В пустыне Деште-Лут существует еще много неисследованных местообитаний, и будущие исследования должны концентрироваться на выделении и идентификации микроорганизмов, особенно экстремофилов, а также на перспективах их применения в биотехнологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abbasi S., Emtiazi G. MALDI-TOF analysis of a novel extremophile peptide purified from *Halarchaeum acidiphilum* ASDL78 with antiarchaeal and antibacterial activities // J. Basic Microbiol. 2020. V. 60. P. 920–930.
- Asgarani E., Soudi M.R., Borzooee F., Dabbagh R. Radio-resistance in psychrotrophic *Kocuria* sp. ASB 107 isolated from Ab-e-Siah radioactive spring // J. Environ. Radioact. 2012. V. 113. P. 171–176.
- Azarderakhsh M., Prakash S., Zhao Y., Agha Kouchak A. Satellite-based analysis of extreme land surface temperatures and diurnal variability across the hottest place on Earth // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2019. V. 17. P. 2025–2029.
- Azua-Bustos A., Urrejola C., Vicuna R. Life at the dry edge: microorganisms of the Atacama desert // FEBS Lett. 2012. V. 586. P. 2939–2945.
- Brim H., Osborne J.P., Kostandarithes H.M., Fredrickson J.K., Wackett L.P., Daly M.J. *Deinococcus radiodurans* engineered for complete toluene degradation facilitates Cr(VI) reduction // Microbiology (SGM). 2006. V. 152. P. 2469–2477.
- Busarakamm K., Bull A.T., Trujillo M.E., Riesco R., Sangal V., van Wezel G.P., Goodfellow M., Modestobacter caceresii sp. nov., novel actinobacteria with an insight into their adaptive mechanisms for survival in extreme hyper-arid Atacama Desert soils // Syst. Appl. Microbiol. 2016. V. 39. P. 243–251.
- Chanal A., Chapon V., Benzerara K., Barakat M., Christen R., Ahouak W., Barras F., Heulin T. The Desert of Tataouine: an extreme environment that hosts a wide diversity of microorganisms and radiotolerant bacteria // Environ. Microbiol. 2006. V. 8. P. 514–525.
- Choi Y.J., Hur J.M., Lim S., Jo M., Kim D.H., Choi J.I. Induction of apoptosis by deinoxanthin in human cancer cells // Anticancer Res. 2014. V. 34. P. 1829–1835.
- Dabbagh R., Ghafourian H., Baghvand A., Nabi G., Riahi H. Bioaccumulation and biosorption of stable strontium and ⁹⁰Sr by *Oscillatoria homogena* cyanobacterium // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2007. V. 272. P. 53–59.
- Daly M.J., Gaidamakova E.K., Matrosova V.Y., Kiang J.G., Fukumoto R., Lee D.Y., Wehr N.B., Viteri G.A., Berlett B.S., Levine R.L. Small-molecule antioxidant proteome-shields in *Deinococcus radiodurans* // PLoS One. 2010. V. 5. e12570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012570>
- de Groot A., Chapon V., Servant P., Christen R., Saux M.F., Sommer S., Heulin T. *Deinococcus deserti* sp. nov., a gamma-radiation-tolerant bacterium isolated from the Sahara Desert // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2005. V. 55. P. 2441–2446.
- Drees K.P., Neilson J.E., Betancourt J.L., Quade J., Henderson D.A., Pryor B.M., Maier R.M. Bacterial community structure in the hyperarid core of the Atacama Desert Chile // Appl. Environ. Microbiol. 2006. V. 72. P. 7902–7908.
- Emadoddin I., Reinsch T., Taube O.F. Drought and desertification in Iran // Hydrology. 2019. V. 6(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology6030066>
- Fatahi-Bafghi M., Rasouli-nasab M., Yasliani-Fard S., Habibnia S., Gharehbaghi F., Eshraghi S.S., Kabir K., Heidarieh P. Diversity and antimicrobial activity of Actinomycetes isolated from Lut desert: The extremely arid climatic zones of Iran // Int. J. Pept. Res. Ther. 2019. V. 25. P. 1201–1207.
- Fendrihan S., Legat A., Pfaffenhuemer M., Gruber C., Weidler G., Gerbl F., Stan-Lotter H. Extremely halophilic archaea and the issue of long-term microbial survival // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2006. V. 5. P. 203–218.
- Gerber E., Bernard R., Castang S., Chabot N., Coze F., Dreux-Zigh A., Hauser E., Hivin P., Joseph P., Lazarelli C., Letellier G., Olive J., Leonetti J.P. *Deinococcus* as new chassis for industrial biotechnology: biology, physiology and tools // J. Appl. Microbiol. 2015. V. 119. P. 1–10.
- Gtari M., Essoussi I., Maaoui R., Sghaier H., Boujmil R., Gury J., Pujic P., Brusetti L., Chouaia B., Crotti E., Daffonchio D., Boudabous A., Normand P. Contrasted resistance of stone-dwelling *Geodermatophilaceae* species to stresses known to give rise to reactive oxygen species // FEMS Microbiol. Ecol. 2012. V. 80. P. 566–577.
- Guesmi S., Pujic P., Nouioui I., Dubost A., Najjari A., Ghedira K., Igual J.M., Miotello G., Cherif A., Armengaud J., Klenk H.P., Normand P., Sghaier H. Ionizing-radiation-resistant *Kocuria rhizophila* PT10 isolated from the Tunisian Sahara xerophyte *Panicum turgidum*: Polyphasic characterization and proteogenomic arsenal // Genomics. 2020. V. 113. P. 317–330.
- Hussain F., Khan I.U., Habib N., Xian W.D., Hozzein W.N., Zhang Z.D., Zhi X.Y., Li W.J. *Deinococcus saudiensis* sp. nov., isolated from desert // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2016. V. 66. P. 5106–5111.
- Kottemann M., Kish A., Iloanusci C., Bjork S., DiRuggiero J. Physiological responses of the halophilic archaeon *Halobacterium* sp. strain NRC1 to desiccation and gamma irradiation // Extremophiles. 2005. V. 9. P. 219–227.
- Lange C.C., Wackett L.P., Minton K.W., Daly M.J. Engineering a recombinant *Deinococcus radiodurans* for organopollutant degradation in radioactive mixed waste environments // Nat. Biotechnol. 1998. V. 16. P. 929–933.
- Lester E.D., Satomi M., Ponce A. Microflora of extreme arid Atacama Desert soils // Soil Biol. Biochem. 2007. V. 39. P. 704–708.
- Leuko S., Domingos C., Parpart A., Reitz G., Rettberg P. The survival and resistance of *Halobacterium salinarum* NRC-1, *Halococcus hamelinensis*, and *Halococcus morrhuae* to simulated outer space solar radiation // Astrobiology. 2015. V. 15. P. 987–997.
- Lin S.M., Baek C.Y., Jung J.H., Kim W.S., Song H.Y., Lee J.H., Ji H.J., Zhi Y., Kang B.S., Bahn Y.S., Seo H.S., Lim S. Anti-

- oxidant activities of an exopolysaccharide (DeinoPol) produced by the extreme radiation-resistant bacterium *Deinococcus radiodurans* // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 55. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56141-3>
- Liu Z., Kim M.C., Wang L., Zhu G., Zhang Y., Huang Y., Wei Z., Danzeng W., Peng F. *Deinococcus taklimakanensis* sp. nov., isolated from desert soil // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2017. V. 67. P. 4311–4316.
- Lyons W.B., Welch S.A., Gardner C.B., Sharifi A., Agha-Kouchak A., Mashkour M., Djarnali M., Matinzadeh Z., Palacio S., Akhiani H. The hydrogeochemistry of shallow groundwater from Lut Desert, Iran: The hottest place on Earth // J. Arid Environ. 2020. V. 178. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104143>
- Maqbool I., Kandan P.V., Dhineshkumar E., Prasad N.R. Free radical scavenging potential and LC-MS based identification of secondary metabolites of *Deinococcus radiodurans* // Int. J. Sci. Technol. Res. 2019. V. 8. P. 1753–1762.
- Maqbool I., Sudharsan M., Kanimozhi G., Alrashood S.T., Khan H.K., Prasad N.R. Crude cell-free extract from *Deinococcus radiodurans* exhibit anticancer activity by inducing apoptosis in triple-negative breast cancer cells // Front. Cell Dev. Biol. 2020. V. 8. P. 807.
- Manobala T., Shukla S.K., Rao T.S., Kumar M.D. A new uranium bioremediation approach using radio-tolerant *Deinococcus radiodurans* biofilm // J. Biosci. 2019. V. 44. P. 122.
- Mattimore V., Battista J.R. Radioresistance of *Deinococcus radiodurans*: Functions necessary to survive ionizing radiation are also necessary to survive prolonged desiccation // J. Bacteriol. 1996. V. 178. P. 633–637.
- Mazkour S., Hosseinzadeh S., Shekarforoush S.S. Evidence of heat-resistant microorganisms with a special emphasis on filamentous Actinomycetes in hyper-arid soils of Gandom Beryan area, Lut Desert, Iran // Iranian J. Microbiol. 2017. V. 9. P. 331–337.
- Misra C.S., Appukuttan D., Kantamreddi V.S., Rao A.S., Apte S.K. Recombinant *D. radiodurans* cells for bioremediation of heavy metals from acidic/neutral aqueous wastes // Bioeng. Bugs. 2012. V. 3. P. 44–48.
- Mohseni M., Abbaszadeh J., Nasrollahi Omran A. Radiation resistant of native *Deinococcus* spp. isolated from the Lut desert of Iran “the hottest place on Earth” // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2014. V. 11. P. 1939–1946.
- Neilson J.W., Quade J., Ortiz M., Nelson W.M., Legatzki A., Tian F., LaComb M., Betancourt J.L., Wing R.A., Soderlund C.A., Maier R.M. Life at the hyperarid margin: novel bacterial diversity in arid soils of the Atacama Desert, Chile // Extremophiles. 2012. V. 16. P. 553–566.
- Orellana R., Macaya C., Bravo G., Dorochevi F., Cumsille A., Valencia R., Rojas C., Seeger M. Living at the frontiers of life: extremophiles in Chile and their potential for bioremediation // Front. Microbiol. 2018. V. 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02309>
- Oren A. microbial life at high salt concentrations: phylogenetic and metabolic diversity // Saline Systems. 2008. V. 4(2). P. 1–13.
- Oren A. Industrial and environmental applications of halophilic microorganisms // Environ. Technol. 2010. V. 31. P. 825–834.
- Oren A. Halophilic archaea on Earth and in space: growth and survival under extreme conditions // Phil. Trans. R. Soc. A. 2014. V. 372. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0194>
- Ouchari L., Boukeskase A., Bouizgarne B., Ouhdouch Y. Antimicrobial potential of actinomycetes isolated from the unexplored hot Merzouga desert and their taxonomic diversity // Biol. Open. 2019. V. 8. <https://doi.org/10.1242/bio.035410>
- Peng F., Zhang L., Luo X., Dai J., An H., Tang Y., Fang C. *Deinococcus xinjiangensis* sp. nov., isolated from desert soil // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2009. V. 59. P. 709–713.
- Rainey F.A., Ferreira M., Nobre M.F., Ray K., Bagaley D., Earl A.M., Battista J.R., Gomez-Silva B., McKay C.P., da Costa M.S. *Deinococcus peraridilitoris* sp. nov., isolated from a coastal desert // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2007. V. 57. P. 1408–1412.
- Rainey F.A., Ray K., Ferreira M., Gatz B.Z., Nobre M.F., Bagaley D., Rash B.A., Park M.J., Earl A.M., Shank N.C., Small A.M., Henk M.C., Battista J.R., Kämpfer P., da Costa M.S. Extensive diversity of ionizing-radiation-resistant bacteria recovered from Sonoran Desert soil and description of nine new species of the genus *Deinococcus* obtained from a single soil sample // Appl. Environ. Microbiol. 2005. V. 71. P. 5225–5235.
- Rao S., Chan Y., Bugler-Lacap D.C., Bhatnagar A., Bhatnagar M., Pointing S.B. Microbial diversity in soil, sand dune and rock substrates of the Thar Monsoon Desert, India // Indian J. Microbiol. 2016. P. 56. P. 35–45.
- Safarpour A., Amoozegar M.A., Ventosa A. Hypersaline environments of Iran: Prokaryotic biodiversity and their potentials in microbial biotechnology // Extremophiles in Eurasian Ecosystems: Ecology, Diversity, and Applications / Eds. Egamberdieva D., Birkeland N.K., Panosyan H., Li W.J. Singapore: Springer, 2018. P. 265–298.
- Salari Z., Kazemi M.J., Shirsalimian M.S. Isolation and molecular identification of halophilic microorganisms from around Saghand uranium mine, Saghand Desert, Iran // Geomicrobiol. J. 2020. V. 37. P. 40–49.
- Schubert B.A., Lowenstein T.K., Timofeeff M.N., Parker M.A. Halophilic Archaea cultured from ancient halite, Death Valley, California // Environ. Microbiol. 2010. V. 12. P. 440–454.
- Schwentner M., Rudov A.V., Rajaei H. Some like it hot: *Phallocryptus fahimii* sp. n. (Crustacea: Anostraca: Thamnocephalidae) from the Lut desert, the hottest place on Earth // Zoology in the Middle East. 2020. V. 66. P. 331–341.
- Shahmohammadi H.R., Asgarani E., Terato H., Saito T., Ohyama Y., Gekko K., Yamamoto O., Ide H. Protective roles of bacterioruberin and intracellular KCl in the resistance of *Halobacterium salinarum* against DNA-damaging agents // J. Radiat. Res. 1998. V. 39. P. 251–262.
- Shahsavari N., Kafilzadeh F., Kargar M. Isolation and identification of thermophiles bacteria from one of the Hottest Places on the Planet (Lut Desert, Iran) and measuring their enzyme activities // Geomicrobiol. J. 2021. V. 38. P. 1–9.
- Shirsalimian M.S., Akhavan Sepahy A., Amoozegar M.A., Kalantar S.M., Dabbagh R. Isolation of a mesophilic and halotolerant strain of *Kocuria polaris* from Gandom Beryan area in the Lut Desert of Iran, moderately resistant to gamma radiation and desiccation // Biosci. Biotech. Res. Asia. 2016. V. 13. P. 2343–2350.

- Shirsalimian M.S., Akhavan Sepahy A., Amoozegar M.A., Kalantar S.M., Dabbagh R.* Isolation of two radiation resistant and desiccation tolerant bacteria, *Modestobacter* sp. A2 and *Maritalea* sp. B9, from Gandom Beryan Hill in the Lut Desert of Iran // *Microbiology (Moscow)*. 2018. V. 87. P. 363–371.
- Shirsalimian M.S., Amoozegar M.A., Akhavan Sepahy A., Kalantar S.M., Dabbagh R.* Isolation of extremely halophilic Archaea from a saline river in the Lut Desert of Iran, moderately resistant to desiccation and gamma radiation // *Microbiology (Moscow)*. 2017. V. 86. P. 403–411.
- Shukla S.K., Rao T.S.*, The first recorded incidence of *Deinococcus radiodurans* R1 biofilm formation and its implications in heavy metals bioremediation // *bioRxiv*. 2017.
- Slade D., Radman M.* Oxidative stress resistance in *Deinococcus radiodurans* // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2011. V. 75. P. 133–191.
- Stan-Lotter H., Fendrihan S.* Halophilic Archaea: life with desiccation, radiation and oligotrophy over geological times // *Life*. 2015. V. 5. P. 1487–1496.
- Ventosa A.*, Unusual microorganisms from unusual habitats hypersaline environments // *Prokaryotic Diversity – Mechanisms and Significance* / Eds. Logan N.A., Lappin-Scott H.M., Oyston P.C.F. Cambridge University Press, 2006. P. 223–254.
- Wierzbos J., De los Ríos A., Ascaso C.* Microorganisms in Desert Rocks: the edge of life on Earth // *Int. Microbiol.* 2012. V. 15. P. 173–183.
- Yazdi A., Emami M.H., Shafiee S.M.* Dashte Lut in Iran, the most complete collection of beautiful geomorphological phenomena of desert // *Open J. Geology*. 2014. V. 4. P. 249–261.
- Yu L.Z., Luo X.S., Liu M., Huang Q.* Diversity of ionizing radiation-resistant bacteria obtained from the Taklimakan Desert // *J. Basic Microbiol.* 2015. V. 55. P. 135–140.
- Yuan M., Zhang W., Dai S., Wu J., Wang Y., Tao T., Chen M., Lin M.* *Deinococcus gobiensis* sp. nov., an extremely radiation-resistant bacterium // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2009. V. 59. P. 1513–1517.
- Zamani A., Marusik Y.M.* The first report on the spider fauna (Arachnida: Araneae) of the Lut Desert, Iran // *Acta Arachnologica*. 2018. V. 67(2). P. 67–75.

The Lut Desert and Its Microbial Diversity: Recent Studies and Future Research

M. S. Shirsalimian¹, S. M. Mazidi², and M. A. Amoozegar^{3,*}

¹Quality Control Department, Production and Development of Cyclotron Radiopharmaceuticals, Pars Isotope Company, Karaj, Iran

²Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

³Extremophiles Laboratory, Department of Microbiology, School of Biology and Center of Excellence in Phylogeny of Living Organisms, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

*e-mail: amoozegar@ut.ac.ir

Received January 21, 2022; revised January 28, 2022; accepted January 30, 2022

Abstract—A significant proportion of the Earth surface is covered by deserts. Despite the stressful environmental conditions, deserts can host diverse microbial populations, especially extremophiles. Due to their remarkable adaptive capabilities, extremophiles have been used in biotechnology and medicine. Understanding microbial diversity in arid environments offers also potential sources of new natural bioactive metabolites. The Lut Desert, located in the eastern part of Iran, is one of the driest and hottest deserts around the world. It presents a collection of unique natural phenomena and geological records. In this review, we describe the previous efforts to show the microbial diversity in the Lut Desert and highlight their promising applications.

Keywords: arid environments, Lut Desert, microbial diversity, extremophiles