Трансформация экосистем
Ecosystem Transformation

ISSN 2619-0931 Online
www.ecosysttrans.com

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-241030
EDN: https://elibrary.ru/zzzcfzl
УДК 579.68, 574.51

Научная статья

Современное состояние бактериальных сообществ перифитона и бентоса в природно-антропогенных биотопах Северного Каспия

Д.Г. Баубекова[1]*, Е.В. Колмыков[2] , Е.М. Мелик-Багдасаров[1]

[1] *ООО Геоэкологический центр «Изыскания. Проектирование. Мониторинг», 117246, Россия, г. Москва, Научный проезд, д. 17*

[2] *ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», 414000, Россия, г. Астрахань, ул. Адмиралтейская, д. 1, корп. 2*

**info@gcipm.ru*

Аннотация. В летний и осенний периоды 2023 г. исследован бактериоперифитон и бактериобентос донных станций, установленных в северной части Каспийского моря в районе морского газоконденсатнонефтяного месторождения им. Ю. Корчагина. На изученных станциях обнаружены: сапротрофные бактерии, численность которых в среднем находилась на уровне млн клеток в перифитоне (кл./см^2) и в бентосе (кл./г сухого веса); количество углеводородокисляющих бактерий достигало нескольких тысяч клеток в исследуемых пробах; численность сульфатредуцирующих и тионовых бактерии не превышала сотен клеток как в перифитоне, так и в грунтах. Общая численность бактерий в среднем равнялась нескольким млн на см^2 в перифитоне и нескольким сотням млн клеток на г сухого веса в бентосе. Общая биомасса бактерий варьировала от десятых долей мгС/м^2 до единиц гС/м^3. Наиболее представленной морфологической группой бактерий в перифитоне донных станций были палочки (72%), далее следовали кокковидные формы (20%), извитые формы встречались в меньшем количестве (8%). В бентосе, наоборот, доминировали кокки (69%), субдоминантами были палочки (23%), вибрионы (8%) также были малочисленной группой. Анализ летне-осенней динамики рассмотренного бактериоценоза выявил снижение изученных показателей в осенний период в среднем в 2.0–2.5 раза. Доля сапротрофов от общей численности бактерий была значительной (по исследуемым сезонам в среднем для перифитона 4.4–5.2% и бентоса 3.8–5.8%) и изменялась в широком диапазоне (от 0.5 до 20.0%). Доля углеводородокисляющей группы от общей численности бактерий составляла сотые, тысячные и десятитысячные доли процента, что характерно для бактериоценозов Северного Каспия. При этом доля сульфатредукторов и тионовых бактерий равнялась тысячным и десятитысячным долям процента. В целом бактериоценоз изученных донных станций представлен стабильным сообществом бактерий, населяющим природно-антропогенные биотопы Северного Каспия.

Ключевые слова: Каспийское море, донные станции, бактериоперифитон, бактериобентос, сапротрофные бактерии, углеводородокисляющие бактерии, сульфатредуцирующие бактерии, тионовые бактерии

ORCID:
Д.Г. Баубекова, https://orcid.org/0000-0002-3288-9487

Для цитирования: Баубекова, Д.Г. и др., 2026. Современное состояние бактериальных сообществ перифитона и бентоса в природно-антропогенных биотопах Северного Каспия. *Трансформация экосистем* **9** (4), 121–136. https://doi.org/10.23859/estr-241030

Поступила в редакцию: 30.10.2024
Принята к печати: 05.09.2025
Опубликована онлайн: 30.10.2026

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-241030
EDN: https://elibrary.ru/zzzcfzl
UDC 579.68, 574.51

Article

Current state of periphyton and benthos bacterial communities in natural-anthropogenic biotopes of the Northern Caspian Sea

D.G. Baubekova[1]*, E.V. Kolmykov[2] ,
E.M. Melik-Bagdasarov[1]

[1] *Center of Geoecology "Survey. Designing. Monitoring" LLC, Nauchny proezd St. 17, Moscow, 117246,Russia*
[2] *LUKOIL-Nizhnevolzhskneft LLC, Admiralteiskaya St. 1, bldg. 2, Astrakhan, 414000 Russia*

**info@gcipm.ru*

Abstract. In the summer and autumn periods of 2023, bacterioperiphyton and bacteriobenthos were studied at the bottom survey stations installed in the northern part of the Caspian Sea in the area of the Yuri Korchagin offshore gas-condensate and oil field. At these stations saprotrophic bacteria were found, their abundance averaged millions of cells: cells/cm^2 in periphyton and cells/g of dry weight in benthos. The number of hydrocarbon-oxidizing bacteria in studied samples reached several thousand cells, while the abundance of sulfate-reducing and thionic bacteria did not exceed hundred cells in both periphyton and grounds. The total bacterial count averaged several million cells per cm^2 in periphyton and several hundred million cells per gram of dry weight in benthos. The total bacterial biomass ranged from tenths of mg C/m^2 to several g C/m^3. The most represented morphological group of bacteria in periphyton at the bottom survey stations were rods (72%), followed by coccoid forms (20%), while curved forms were found in smaller amounts (8%). In benthos, on the contrary, cocci were dominant (69%), rods were subdominant (23%), while vibrios (8%) were also a minor group. The analysis of the summer–autumn dynamics of the studied bacteriocenosis revealed a decrease in the studied parameters in the autumn period by an average factor of 2.0–2.5. The proportion of saprotrophs in the total bacterial count was substantial (it ranged from 4.4 to 5.2% for periphyton and from 3.8 to 5.8% for benthos, on the average, across the seasons of survey) and varied within a wide range (from 0.5 to 20.0%). The proportion of hydrocarbon-oxidizing group in the total bacterial count amounted to hundredths, thousandths, and

ten-thousandths of a percent, which is typical for bacteriocenoses of the Northern Caspian Sea. At the same time, the proportion of sulfate-reducing and thionic bacteria amounted to thousandths and ten-thousandths of a percent. Overall, the bacteriocenosis of the studied bottom stations was represented by a stable bacterial community inhabiting the natural-anthropogenic biotopes of the Northern Caspian Sea.

Keywords: Caspian Sea, bottom stations, bacterioperiphyton, bacteriobenthos, saprotrophic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria, sulfate-reducing bacteria, thionic bacteria

ORCID:
D.G. Baubekova, https://orcid.org/0000-0002-3288-9487

To cite this article: Baubekova, D.G. et al., 2026. Current state of periphyton and benthos bacterial communities in natural-anthropogenic biotopes of the Northern Caspian Sea. *Ecosystem Transformation* **9** (4), 121–136. https://doi.org/10.23859/estr-241030

Received: 30.10.2024
Accepted: 05.09.2025
Published online: 30.10.2026

Введение

Природно-антропогенными биотопами можно назвать участки живой природы (в частности, морской среды) с потенциально высокой степенью антропогенного воздействия. В настоящее время экологически обоснованным способом поддержания биоразнообразия и биопродуктивности подобных местообитаний является внесение искусственных биотехнических конструкций (Ахмедова и др., 2011a; Исакова, 2009).

Установленные в морскую среду конструкции, состоящие из донных и пелагических частей, в целом усиливают продуктивность биологических сообществ, увеличивают биологическую деструкцию загрязняющих веществ, формируют индикаторные сообщества и повышают потенциал гидробионтов в самоочищении исследуемого водоема (Ахмедова и др., 2011a, b; Умербаева и др., 2019; Ушивцев и др., 2008, 2017). Бактерии являются одним из важнейших компонентов, участвующих в активном пионерном заселении донных станций и формировании на них различных обрастаний наряду с фито- и зооперифитоном.

Видовой состав биологических сообществ донных конструкций может отражать экологическое благополучие их местообитания. В данном случае наиболее показательны бентосные сообщества, где в зависимости от происходящих вокруг процессов (как природных, так и антропогенных) может меняться соотношение формирующих биоразнообразие видов (Водовский, 2016; Курапов и др., 2016; Ушивцев и др., 2017).

Донные отложения Каспия обильно заселены микроорганизмами (Баубекова и др., 2022; Идрисова и др., 2016; Колотова и др., 2017; Менькова и др., 2019; Умербаева и др., 2011). В грунтах наиболее широко распространены сапротрофные микроорганизмы, однако их численность подвержена значительным колебаниям, зависящим от наличия питательного субстрата. Присутствие других узкоспециализированных групп бактерий в донных осадках определяется в основном их метаболическими особенностями; численность данных бактерий может варьировать в широких пределах. При этом грунты служат аккумулятором не только для поступающих в акваторию органических веществ, различных аллохтонных микроорганизмов, но и поллютантов. Одной из важнейших характеристик донных биоценозов является численность и соотношение групп гетеротрофных бактерий. Вследствие своих физиологических особенностей гетеротрофные бактерии гораздо быстрее по сравнению с другими компонентами водных биоценозов реагируют на изменения условий в среде своего обитания. Кроме того, они играют решающую роль в минерализации органического вещества и круговороте биогенов, а также активно участвуют в процессах самоочищения моря наряду с другими группами микроорганизмов.

На фоне интенсификации хозяйственной деятельности на Каспии весьма актуальны вопросы разработки и применения мер, направленных на стабилизацию и оздоровление морской среды,

повышение ее устойчивости и биопродуктивности за счет использования различных искусственных биологических систем. Также очень перспективно изучение бактериоценоза донных систем, включающее исследования не только общей численности и общей биомассы бактерий и их сапротрофной группы, но и узкоспециализированных групп микроорганизмов: углеводородокисляющих, сульфатредуцирующих и тионовых бактерий.

Целью проведенного исследования являлась оценка современного состояния бактериальных сообществ перифитона и бентоса в природно-антропогенных биотопах Северного Каспия в летний и осенний периоды 2023 г.

Материалы и методы

В ходе работы, проведенной в рамках экологического мониторинга, во второй декаде июля и в первой декаде сентября 2023 г. отобраны 64 пробы бактериоперифитона (основная и пелагическая части) и 32 пробы бактериобентоса с донных станций (ДС), установленных на морское дно в северной части Каспийского моря в районе морского газоконденсатнонефтяного месторождения им. Ю. Корчагина (Рис. 1). Глубина расположения станций варьирует от 10.1 до 11.3 м.

Сбор проб бактериоперифитона осуществляли водолазным скребком с поверхности основной части донных станций и ножницами с пелагических частей в стерильные полимерные емкости (Рис. 2). Отбор проб бактериобентоса производили с помощью дночерпателя Ван-Вина с площадью захвата 0.025 и 0.1 м^2 согласно ГОСТ 17.1.5.01–80[1] и ГОСТ 17.4.4.02–2017[2].

Учет общей численности бактерий (ОЧБ) проводили стандартным методом эпифлуоресцентной микроскопии (Руководство по гидробиологическому мониторингу, 1992; Теппер, 2004; Hoff, 1993). Для этого фиксированный объем аликвоты пробы окрашивали флуоресцентным красителем акридиновым оранжевым и фильтровали через мембранные поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм. Окрашенные фильтры просматривали при увеличении ×1000 на люминесцентном микроскопе «Микромед 3-ЛЮМ». Размер клеток бактерий определяли при помощи системы визуализации ToupCam. Объем клеток вычисляли по методу геометрического подобия по формуле шара для кокков и по формуле цилиндра для вибрионов и палочковидных форм. Общую бактериальную биомассу (ОББ) рассчитывали в соответствии с объемами бактериальных клеток с последующим пересчетом в мг веса в углеродных единицах на 1 м^3 (Романова и Сажин, 2010).

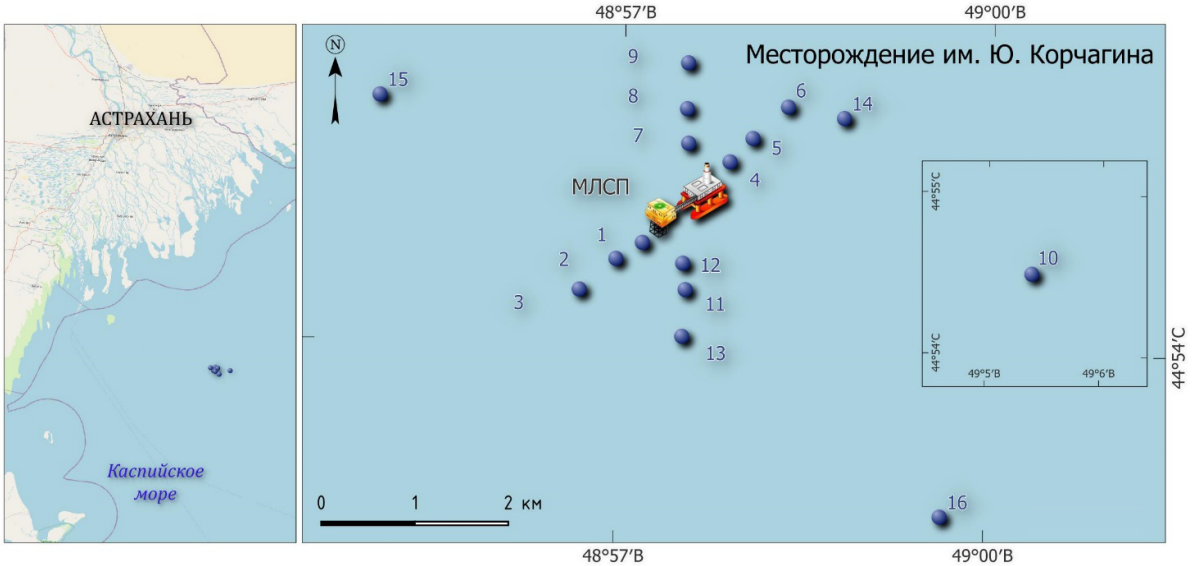


Рис. 1. Схема расположения исследованных донных станций в акватории Северного Каспия в районе морского газоконденсатнонефтяного месторождения им. Ю. Корчагина.

[1] ГОСТ 17.1.5.01–80 «Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность».

[2] ГОСТ 17.4.4.02–2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».

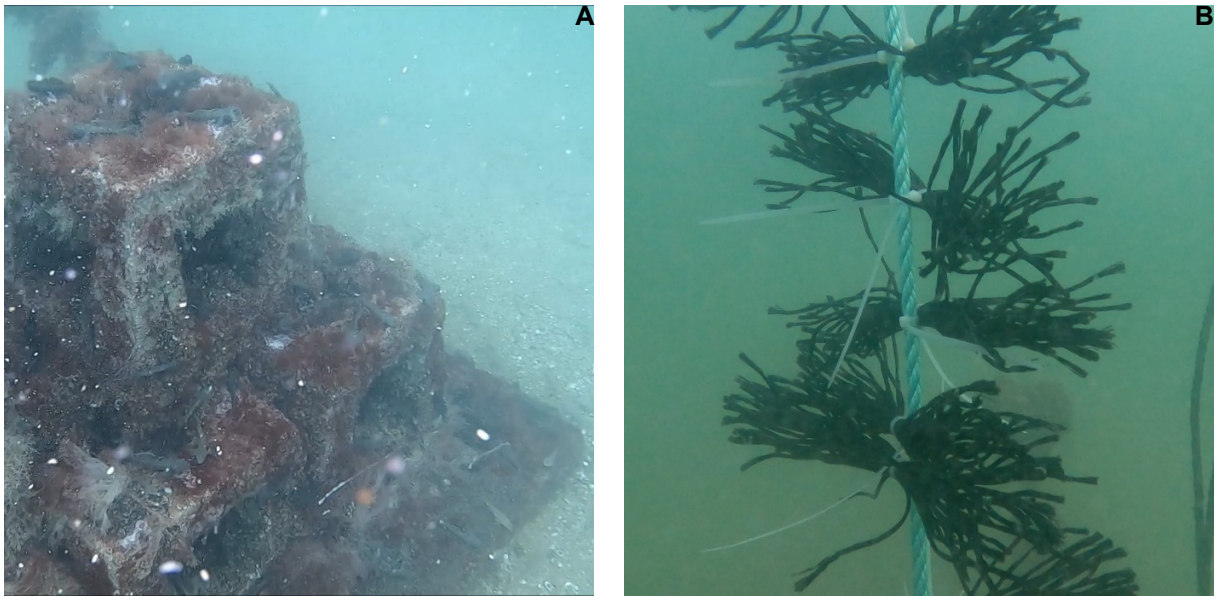


Рис. 2. Донные станции на дне Каспийского моря: **A** – донные бетонные блоки, **B** – капроновые нити пелагической части станции.

Численность эколого-физиологических групп бактерий (сапротрофных, углеводородокисляющих, сульфатредуцирующих, тионовых) определяли методом предельных разведений на жидких элективных средах в трех повторностях (Нетрусов, 2005). Для определения численности культивируемых бактерий на питательных средах была подготовлена серия последовательных разведений исходной аликвоты пробы с шагом 10. Для сапротрофных бактерий (СБ) использовалась среда Зобелл с высоким содержанием органических веществ; для углеводородокисляющих бактерий (УоБ) – среда Миллса (ММС) с добавлением 0.1% стерильного дизельного топлива в качестве единственного источника углерода и энергии; для сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) – среда Постгейта Б, содержащая в качестве органического субстрата молочнокислый кальций; для тионовых бактерий (ТБ) – питательная среда с тиосульфатом натрия (Дзержинская, 2008). Посевы инкубировались в термостате от одной недели до месяца при необходимой для культивации исследуемой группы микроорганизмов температуре. Наиболее вероятная численность (НВЧ) в пробе определялась по статистической таблице Мак-Креди (Нетрусов, 2005).

Пробы для определения воздушно-сухого веса (с.в.) и влажности взвешивали и высушивали в сушильном шкафу до полного испарения влаги. После этого определяли вес сухой пробы и рассчитывали коэффициент для последующего пересчета микробиологических показателей на воздушно-сухой вес (Теппер, 2004).

Оценку разброса данных в экспериментах проводили подсчетом средних величин и среднего квадратичного отклонения для выявления доверительного интервала при 95% уровне значимости (Лялин и др., 2010; Новиков и Новочадов, 2005). Результаты экспериментов обрабатывали стандартными методами математической статистики с помощью пакета программ Microsoft Excel 21 и программы Statistica 10.0.

Результаты исследования

Общая численность бактериоперифитона на основных частях ДС, расположенных в районе морского газоконденсатнонефтяного месторождения им. Ю. Корчагина, летом 2023 г. в среднем равнялась 94.39 млн кл./см^2, изменяясь от 86.98 до 101.04 млн кл./см^2 (Рис. 3**A**). На пелагических частях данный показатель колебался в меньшем диапазоне (от 57.02 до 77.97 млн кл./см^2) и в среднем находился на уровне 65.93 млн кл./см^2. При этом общая численность бактериобентоса на ДС была выше (137.10 млн кл./г с.в.), варьируя от 104.22 до 169.99 млн кл./г с.в. (Рис. 3**B**) Осенью ОЧБ основной части ДС изменялась от 33.15 до 56.49 млн кл./см^2, среднее значение составляло 45.35 млн кл./см^2. На пелагических частях ДС рассматриваемый показатель снижался и в среднем

равнялся 37.41 млн кл./см^2, варьируя в небольших пределах (от 34.74 до 41.90 млн кл./см^2). Общая численность бентоса также была выше значений бактериоперифитона (52.41 млн кл./г с.в.), изменяясь от 34.21 до 68.68 млн кл./г с.в.

Анализ летне-осенних изменений общей численности бактериоперифитона показал снижение рассматриваемого показателя от лета к осени почти в 2 раза как на донных, так и на пелагических частях (Рис. 3). Как в летний, так и осенний периоды исследований значения ОЧБ на основных частях преобладали над количественными величинами пелагических частей, что вполне закономерно ввиду большего контакта первых с донными отложениями, а также характера исследуемых обрастаний (друзы из двустворчатых моллюсков, водоросли и др.). Показатели бактериобентоса осенью также уменьшались в 2.5 раза по сравнению с летними значениями. В оба периода исследований величины ОЧБ в грунтах были выше значений ОЧБ перифитона на основных частях ДС.

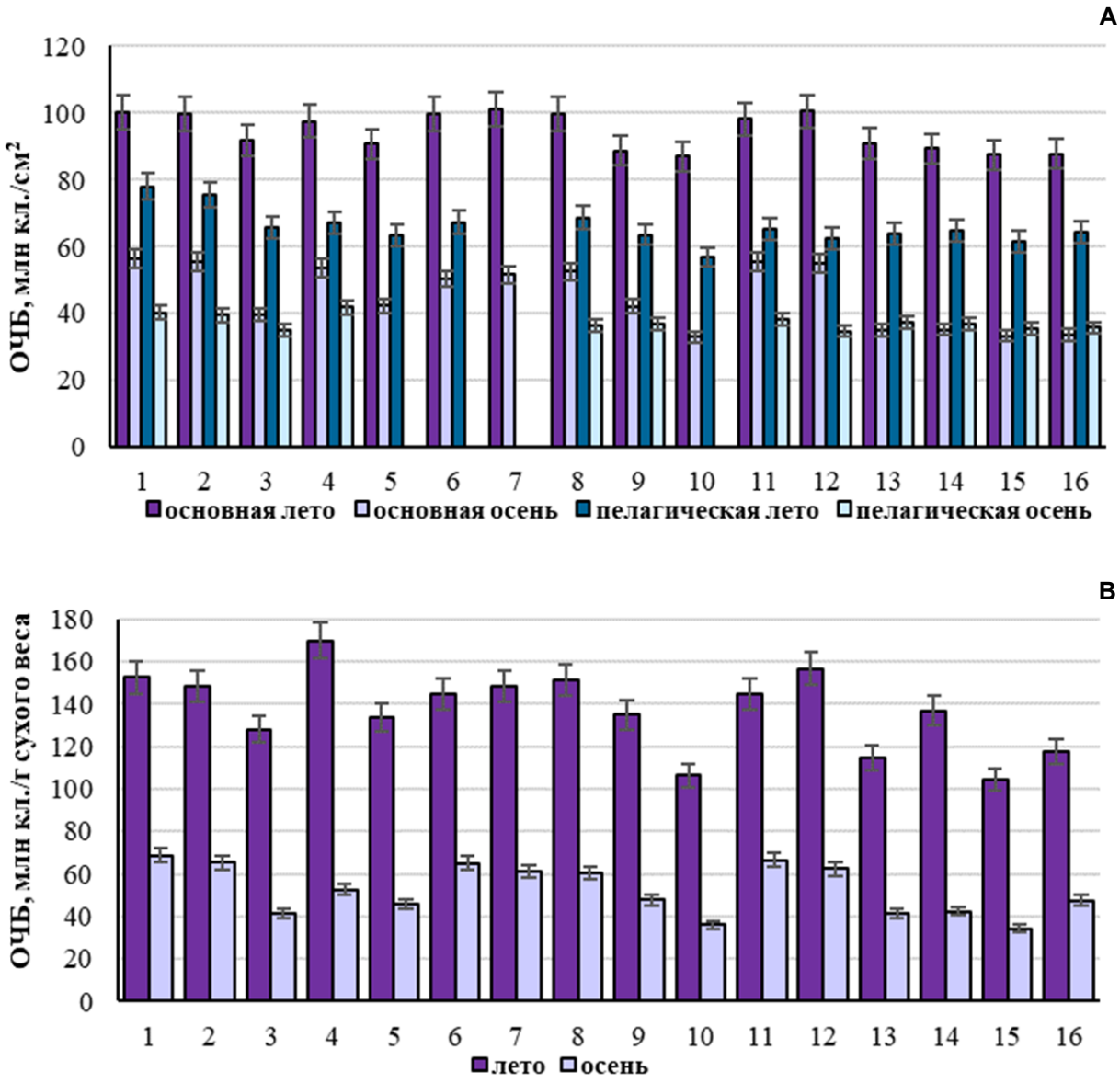


Рис. 3. Изменение общей численности бактериоперифитона основной и пелагической частей (**A**) и бактериобентоса (**B**) донных станций в акватории Северного Каспия в 2023 г[3].

[3] Пелагические пробы не были отобраны летом на станции 7, осенью на станциях 5, 6, 7, 10 в связи с утратой пелагических частей станций по независящим от нас причинам.

Значения общей биомассы бактериоперифитона на основных частях ДС летом в среднем равнялись 59.98 мгС/м^2, колеблясь в незначительных пределах 38.68–92.73 мгС/м^2 (Рис. 4**A**). На пелагических частях данный показатель изменялся в меньшем диапазоне (от 37.88 до 60.27 мгС/м^2), в среднем был ниже и находился на уровне 48.86 мгС/м^2. При этом среднее значение общей биомассы бактериобентоса на ДС равнялось 6.66 гС/м^3, варьируя в пределах 5.09–9.53 гС/м^3 (Рис. 4**B**). В осенний период исследований на основных частях ДС показатели ОББ перифитона изменялись от 16.35 до 44.23 мгС/м^2, среднее значение составляло 28.83 мгС/м^2. На пелагических частях данный показатель в среднем также был меньше и находился на уровне 19.84 мгС/м^2, колеблясь в меньших пределах (16.60–22.49 мгС/м^2). Общая биомасса бактериобентоса на ДС равнялась 3.22 гС/м^3, варьируя при этом в небольшом диапазоне (1.94–4.23 гС/м^3).

Общая биомасса бактериоперифитона на донных станциях осенью по сравнению с летом снижалась в 2–2.5 раза (Рис. 4). Аналогично ОЧБ, значения ОББ на пелагических частях ДС были ниже значений на основных частях в оба периода исследований. Общая биомасса бактериобентоса осенью также уменьшалась в 2 раза. Как и в случае с ОЧБ, величины ОББ донных отложений превышали значения ОББ основных частей ДС и в летний, и в осенний периоды исследований.

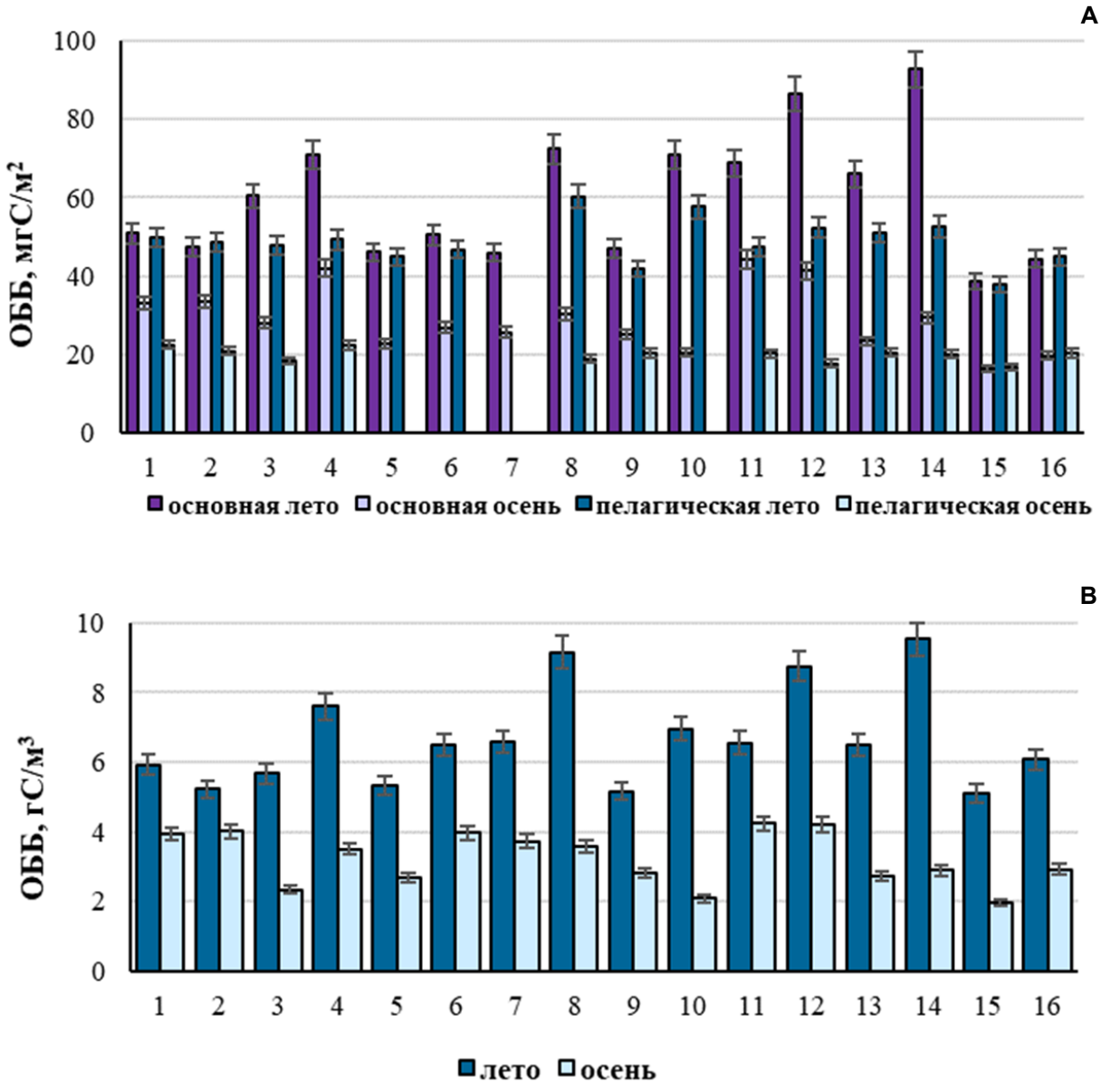


Рис. 4. Изменение общей биомассы бактериоперифитона основной и пелагической (**A**) частей и бактериобентоса (**B**) донных станций в акватории Северного Каспия в 2023 г.[4]

Распределение бактерий в перифитоне и донных отложениях было неоднородным: количественные показатели бактериобентоса преобладают над величинами бактериоперифитона (Рис. 5).

В пространственном отношении максимальные значения рассматриваемых микробиологических показателей в оба периода исследований регистрировали в основном в центральной части изученной акватории на станциях с минимальной глубиной отбора (10.1–10.4 м), что связано с формированием более благоприятных условий для развития бактерий по мере уменьшения глубин исследуемых станций. Минимальные величины на исследуемых ДС регистрировали на более глубоководных периферических станциях акватории (10.7–11.3 м).

Наиболее представленной морфологической группой бактерий в перифитоне донных станций были палочки (72%), вторыми по обнаружению были кокковидные формы (20%), извитые формы встречались в меньшем количестве (8%) (Рис. 6). В бентосе наблюдалась иная картина: основной вклад внесли кокки (69%), далее следовали палочки (23%), вибрионы (8%) характеризовались наименьшими значениями количественных показателей. Диапазон распределения бактерий по морфологическим группам на разных станциях варьировал в небольших пределах, что свидетельствует о

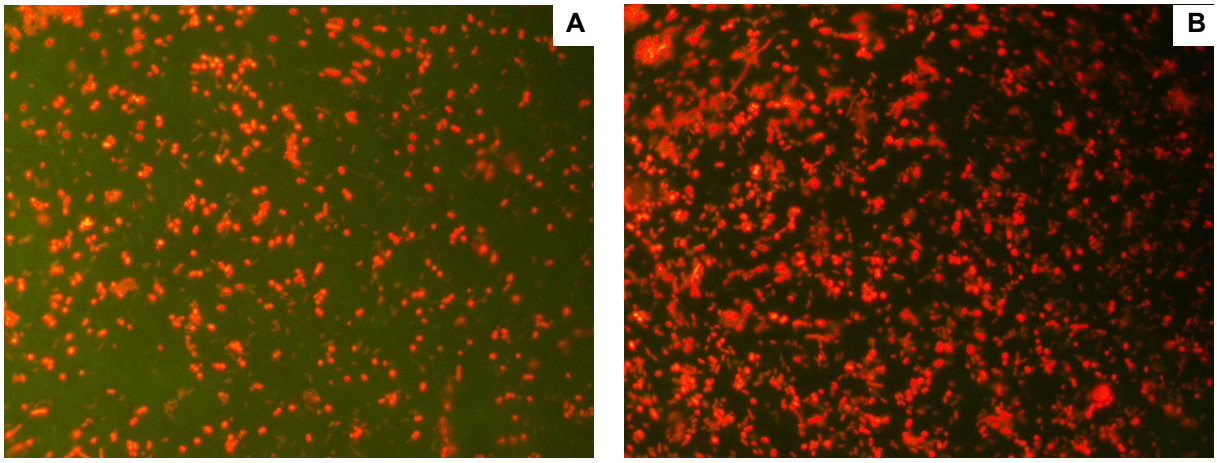


Рис. 5. Бактериоперифитон (**A**) и бактериобентос (**B**) на донных станциях (эпифлуоресцентная микроскопия, ×1000).

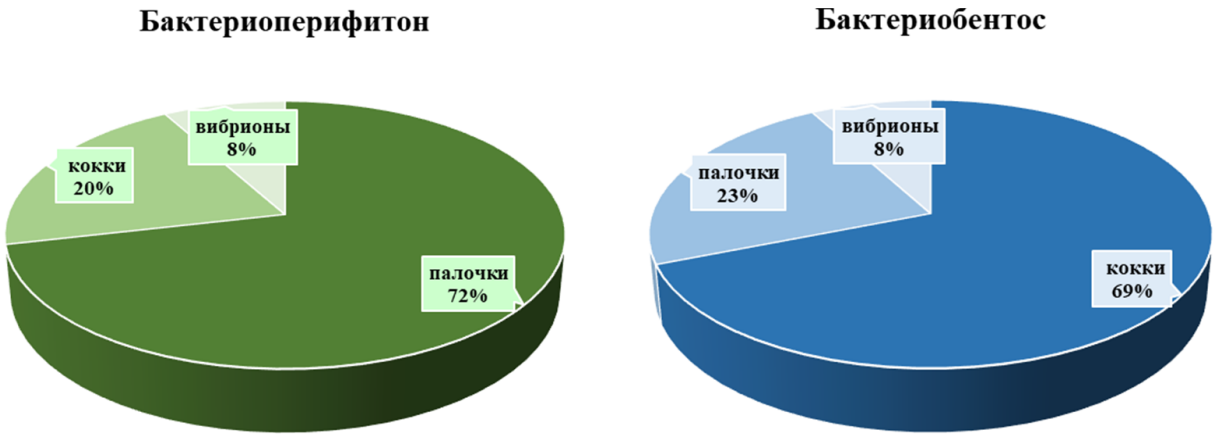


Рис. 6. Соотношение морфологических групп бактериоперифитона и бактериобентоса донных станций в акватории Северного Каспия в 2023 г.

[3] Пелагические пробы не были отобраны летом на станции 7, осенью на станциях 5, 6, 7, 10 в связи с утратой пелагических частей станций по независящим от нас причинам.

стабильности развивающегося на ДС бактериоценоза. Полученные данные, возможно, объясняются тем, что формирование кокковых форм можно рассматривать как способ пережидания неблагоприятных условий, в частности, это характерно для палочковидных бактерий (Павлова и др., 2021).

Численность сапротрофной группы гетеротрофов в бактериоперифитоне ДС находилась на уровне несколько млн клеток на см^2 и в основном демонстрировала снижение значений от лета к осени, преобладая по количественным показателям на основных частях ДС (Рис. 7**А**). Следует отметить, что летом диапазон варьирования показателя был шире по сравнению с осенними значениями как для основной, так и для пелагической частей. В оба периода исследований доля сапротрофной группы от общей численности бактериоперифитона двух исследуемых частей ДС в среднем составляла 4.4–5.2% и варьировала в достаточно широких пределах (от 0.5 до 20.0%), что объясняется в первую очередь значительным естественным присутствием культивируемых сапротрофных групп в общем составе бактериоценоза перифитона ДС на изучаемой акватории месторождения в оба периода проведенных исследований. При этом осенью диапазон данных колебаний процентного содержания был меньше.

Концентрация сапротрофов в бактериобентосе ДС соответствовала нескольким млн кл. на г с.в. и также снижалась в осенний период (Рис. 7**В**). Доля сапротрофной группы от общей численности бактериобентоса в оба периода исследований в среднем равнялась 3.8–5.8% и изменялась в большом диапазоне (0.7–17.3%), продолжая быть доминирующей группой среди изученных групп бактерий. Осенью пределы варьирования численности бактериобентоса в сравнении с количественными значениями бактериоперифитона в осенний период были шире, что, скорее всего, связано с продолжающимися процессами минерализации органических веществ в исследуемом водоеме. Также нужно отметить, что сапротрофы в целом имеют относительно высокую численность по сравнению с другими группами бактерий (Колотова и др., 2017; Умербаева и др., 2011), а сами донные осадки способны к аккумулированию органических и минеральных веществ, создавая благоприятные условия для развития бактерий.

В пространственном отношении прослеживалась гетерогенность распределения численности сапротрофной группы гетеротрофов на исследуемых ДС. Однако в основном наибольшие показатели регистрировали в центральной части рассмотренной акватории, где располагались станции с минимальной глубиной отбора. Наименьшие значения численности сапротрофов отмечали на более глубоководных станциях.

Количественное содержание сульфатредуцирующей группы бактерий на основных и пелагических частях ДС снижалась к осени, варьируя от сотен до тысяч кл./см^2 в летний период ис-

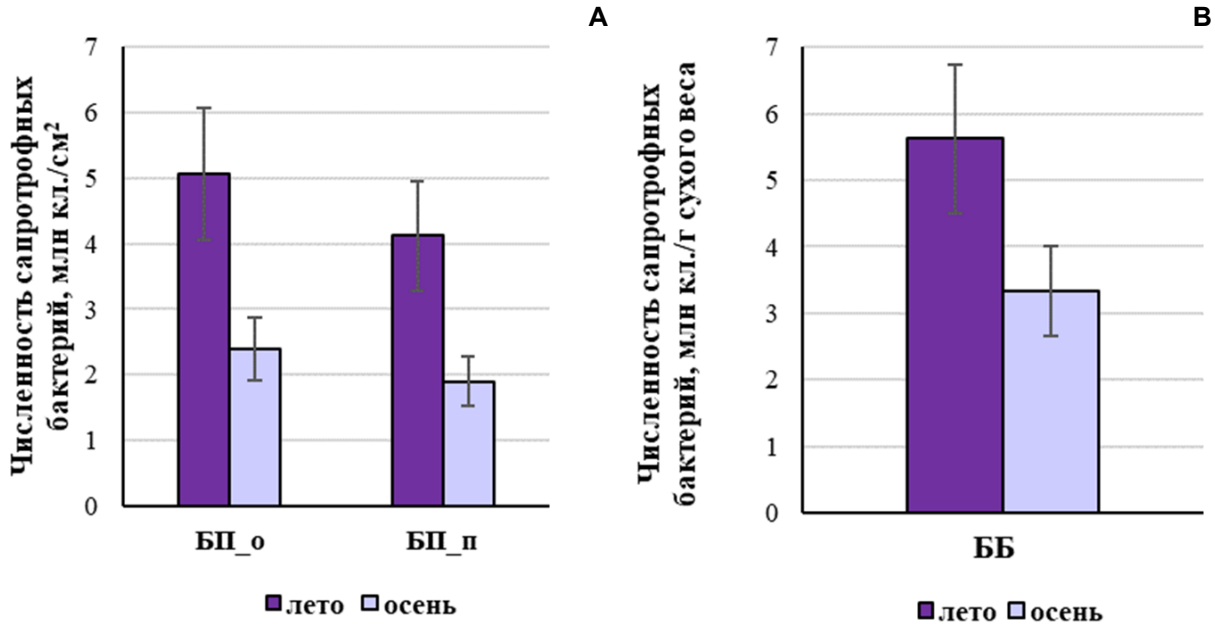


Рис. 7. Изменение численности сапротрофных бактерий основной (БП_о) и пелагической (БП_п) частей (**А**) и бактериобентоса (ББ) (**В**) донных станций в акватории Северного Каспия в 2023 г.

следований и в пределах десятков и сотен кл./см^2 в осенний (Рис. 8**A**). Сульфатредуцирующие бактерии характеризовались относительно высокими количественными значениями летом по сравнению с осенью; в большинстве осенних проб перифитона исследуемая группа отсутствовала. Летом рост сульфатредукторов не был зафиксирован на 3 станциях основных частей ДС и 5 станциях пелагических частей ДС, осенью – уже на 10 и 12 станциях соответственно. Отсутствие сульфатредукторов на некоторых станциях, вероятнее всего, связано с недостаточной возможностью создания анаэробных условий среды на основных и пелагических частях ДС (Бурдиян, 2022; Бурдиян и Алемов, 2020).

В донных осадках сульфатредукторы в летний период находились на уровне млн кл./г с.в., изменяясь от несколько сотен до млн кл./г с.в. Осенью численность снизилась до сотен кл./г с.в., колеблясь в меньших пределах (Рис. 8**B**). Вероятнее всего, в грунтах создавались более благоприятные условия для развития данной группы бактерий. В летний период рост сульфатредукторов в бентосе не отмечался на одной станции, осенью они уже не встречались на 8 станциях месторождения. В исследуемые периоды доля сульфатредукторов от ОЧБ составляла тысячные и десятитысячные доли процента во всех изученных пробах.

В основном данная группа развивалась на ДС с большей глубиной расположения, где создаются более благоприятные условия для развития сульфатредукторов. Минимальные количественные значения фиксировали на станциях с меньшей глубиной отбора.

Тионовые бактерии на большинстве ДС присутствовали в небольших количествах, варьируя от десятков до сотен кл./см^2 и снижаясь от лета к осени в большей степени на пелагических частях (Рис. 9**A**). В бактериобентосе также наблюдалась динамика снижения численности в осенний период исследований почти в 3 раза. При этом диапазон варьирования показателя летом был шире, чем осенью (Рис. 9**B**). В оба периода исследований доля тионовых бактерий от ОЧБ во всех пробах составляет тысячные и десятитысячные доли процента. Как и в случае сульфатредукторов, тионовые бактерии регистрировали не на всех станциях месторождения: летом на 5 станциях основных частей ДС, 4 станциях пелагических частей ДС и на 3 станциях в бентосе; осенью рост наблюдали только на 4 станциях. Полученная микробиологическая картина, вероятнее всего, объясняется метаболическими особенностями данной группы бактерий: наличием веществ, выступающих источниками углерода и энергии для рассмотренных бактерий (Бурдиян, 2022; Бурдиян и Алемов, 2020). В пространственном отношении распределение численности тионовых бактерий носило мозаичный характер в оба периода исследований.

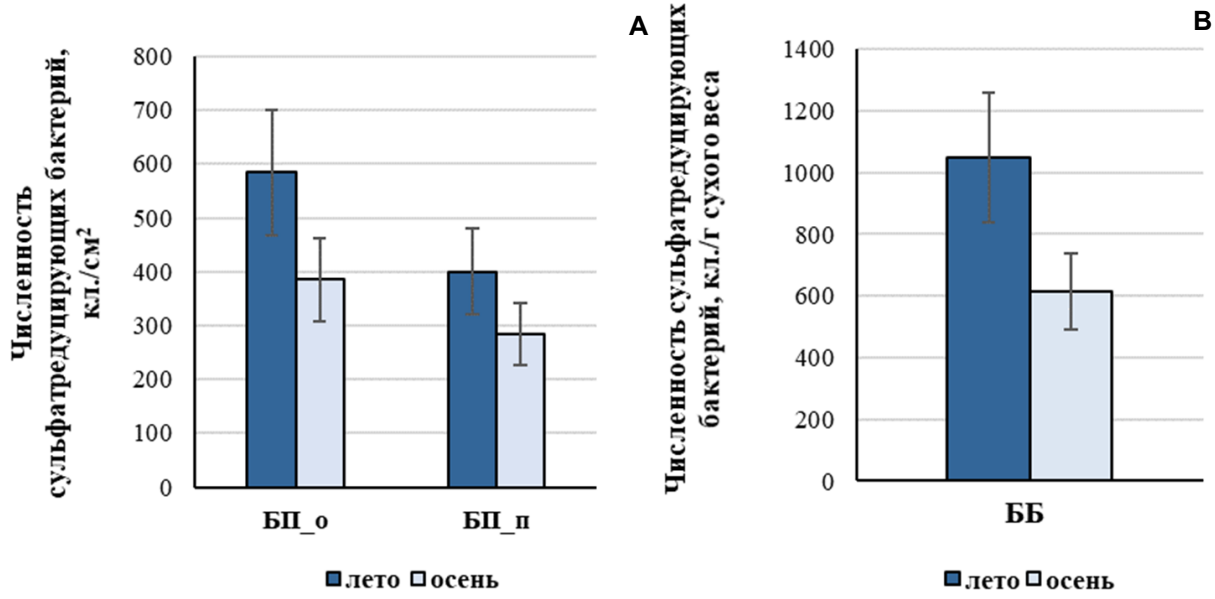


Рис. 8. Изменение численности сульфатредуцирующих бактерий основной (БП_о) и пелагической (БП_п) частей (**A**) и бактериобентоса (ББ) (**B**) донных станций в акватории Северного Каспия в 2023 г.

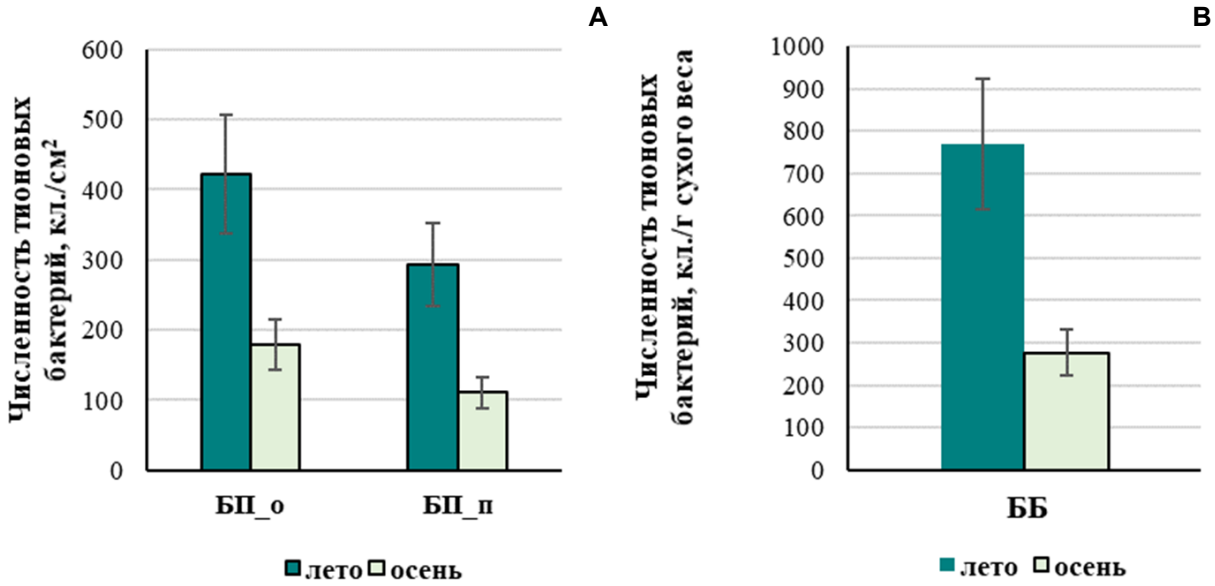


Рис. 9. Изменение численности тионовых бактерий основной (БП_о) и пелагической (БП_п) частей (**А**) и бактериобентоса (ББ) (**В**) донных станций в акватории Северного Каспия в 2023 г.

Численность углеводородокисляющей группы гетеротрофов на донных станциях также уменьшалась почти в 2 раза в осенний период исследований и в среднем находилась на уровне несколько тысяч кл./см^2 в оба периода исследования, варьируя в меньшем диапазоне осенью. Как и сапротрофы, данные бактерии-деструкторы в количественном отношении преобладали на основных частях ДС, встречаясь на пелагических частях ДС в меньшем количестве. В исследуемые периоды доля углеводородокисляющих бактерий от ОЧБ составляла сотые, тысячные и десятитысячные доли процента во всех исследованных пробах бактериоперифитона, что свидетельствует о смещении в сторону преобладания сапротрофной группы гетеротрофов и характерно для бактериоценозов Северного Каспия (Баубекова и др., 2022; Колотова и др., 2017; Менькова и др., 2019). В бактериобентосе наблюдалась схожая картина снижения численности осенью. Как и в случае бактериоперифитона, сапротрофный бактериобентос доминировал над углеводородокисляющим. Доля последнего в ОЧБ в среднем равнялась 0.72%, варьируя в меньших пределах.

Пространственное распределение углеводородокисляющих бактерий было неравномерным. Однако, как и в случае с количественным распределением сапротрофов, деструкторы в основном концентрировались на севере изучаемой акватории. Минимальные зоны численности регистрировали на периферии с большей глубиной расположения.

Обсуждение результатов

Общая численность бактерий в донных отложениях исследуемых станций, выступающих своеобразными природно-антропогенными биотопами в рассмотренной части Каспийского моря, в среднем равнялась нескольким сотням млн кл./г, что соответствует диапазону общей численности бактериобентоса, указанной в литературных источниках: от 10 до 10^6 млн кл./г в зависимости от сезонных условий (Баубекова и др., 2022; Идрисова и др., 2016; Колотова и др., 2017; Менькова и др., 2019; Умербаева и др., 2011). При этом численность сапротрофных бактерий в грунтах от общего числа бактериобентоса в среднем составляла 4.4–5.2%, что также соотносится с литературными данными (0.02–5.00% от общей численности бактерий бентоса). Присутствие других узкоспециализированных групп бактерий в донных осадках определяется в основном метаболическими особенностями данных бактерий, численность которых может варьировать в широких пределах: от единичных клеток до тысяч клеток в 1 г грунта. В исследуемый период численность данных групп в среднем находилась на уровне сотен клеток на г.

В составе бактериоперифитона и бактериобентоса изучаемых донных станций обнаружены бактерии всех исследуемых эколого-физиологических групп, заселяющих природно-антропогенные биотопы рассмотренной части Каспия: сапротрофные, углеводородокисляющие, сульфатредуцирующие и тионовые бактерии. Наличие сапротрофов на всех изученных станциях и их

преобладание по численности и биомассе объясняется тем, что сапротрофная группа обладает высокими темпами развития и использует в своем метаболизме лабильное органическое вещество, в высоких концентрациях присутствующее в исследуемой акватории. В то же время узкоспециализированные группы бактерии отсутствовали на некоторых станциях, что можно объяснить отсутствием питательных веществ, служащих источниками углерода и энергии для данных групп. Нужно отметить, что углеводородокисляющая группа гетеротрофов является естественным компонентом бактериоценоза морских водоемов и способна кроме углеводородов использовать широкий спектр органических субстратов. Согласно данным химических исследований, проводимых в рамках экологического мониторинга в рассмотренной акватории, содержание нефтепродуктов в донных отложениях было ниже предела обнаружения используемой методики измерений[5], что указывает на естественное присутствие данной бактериальной группы на изучаемых донных станциях. Наличие в изучаемом бактериоценозе донных станций таких узкоспециализированных групп бактерий, как сульфатредукторы и тионовые бактерии, указывает на естественно протекающие процессы анаэробной деструкции.

Анализ летне-осенних сукцессий исследуемого бактериоценоза выявил изменение рассматриваемых показателей: наблюдается их снижение в осенний период, что может быть связано с завершением процессов минерализации органических веществ в грунтах, а также с постепенным истощением запасов растворенных в воде питательных веществ, вовлекаемых в биохимическую деятельность рассматриваемых групп бактерий.

Преобладание количественных показателей бактериоценоза на основных частях донных станций над значениями для пелагических частей, а также большая численность и биомасса бактериобентоса по сравнению с бактериоперифитоном объясняется, во-первых, максимальным контактом основной части донной станции с грунтом, а, во-вторых, характером исследуемых обрастаний и большей аккумулирующей способностью донных осадков по сравнению со способностью к накоплению обрастаний изучаемых донных станций.

В пространственном распределении общей численности, общей биомассы бактериоперифитона и бактериобентоса и сапротрофной группы гетеротрофов отмечено, что максимальные значения характерны для центральной части исследуемой акватории в основном в зонах с минимальной для данного месторождения глубиной (10.1–10.4 м). Минимальные величины рассматриваемых показателей, наоборот, фиксировали на более глубоководных участках месторождения: по периферии исследуемой акватории (10.7–11.3 м). Данная микробиологическая картина вполне закономерна и объясняется формированием более благоприятных условий для развития бактерий с уменьшением глубины изучаемых станций. Наименьшие и наибольшие значения общей численности и общей биомассы бактерий грунтов и основных частей донных станций в основном имели схожее пространственное расположение, указывающее на тесную связь двух рассматриваемых горизонтов исследования. В пространственном отношении распределение численности узкоспециализированных групп бактерий носило мозаичный характер. Однако для сульфатредукторов в среднем максимальное развитие регистрировали на ДС с большей глубиной, где создаются более благоприятные условия для данной группы. Пространственное распределение численности углеводородокисляющих и тионовых бактерий было более неравномерным.

Бактериоценоз изученных донных станций представлен бактериальным сообществом, активно заселяющим природно-антропогенные биотопы Каспийского моря. Среди рассмотренных эколого-физиологических групп преобладала сапротрофная, доля которой от общей численности бактерий была значительной (до 20%). Углеводородокисляющие, сульфатредуцирующие и тионовые бактерии высевались с исследуемых перифитонных частей и донных отложений в меньшем количестве. Общая численность и биомасса бактерий на рассмотренных донных станциях соответствовали количественным характеристикам бактериоценозов рассмотренной части Каспийского моря. Таким образом, установка донных станций в акватории Северного Каспия, подверженной различному антропогенному воздействию, способна внести вклад в поддержание биопродуктивности исследуемой морской акватории за счет пионерного заселения бактериальной группой природно-антропогенных биотопов, выступающей первичным звеном в трофической структуре формирующихся биоценозов.

---

[5] ПНД Ф 14.1:2:4.168. Количественный химический анализ вод. Методика (метод) измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных водах методом ИК-спектрофотометрии с применением концентратомеров серии КН.

Список литературы

Ахмедова, Г.А., Ушивцев, В.Б., Монахова, Г.А., Галактионова, М.Л., 2011a. Формирование донной фауны в Северном и Среднем Каспии в районе установки искусственных рифовых модулей. *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки* **3** (16), 40–43.

Ахмедова, Г.А., Ушивцев, В.Б., Гасангаджиева, А.Г., 2011b. Биоресурсный потенциал и особенности биопродукционных возможностей искусственных биотехнических конструкций в условиях Северного и среднего Каспия. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета* **71**, 510–523.

Баубекова, Д.Г., Проскурина, В.В., Воронина, Е.А., 2022. Влияние природных факторов на численность сапротрофных и нефтеокисляющих бактерий в северной части Каспийского моря. *Материалы X международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса»*. Москва, Россия, 260–263.

Бурдиян, Н.В., Алемов С.В., 2020. Анаэробные бактерии в прибрежных наносах бухты Троицкой (Севастополь, Черное море). *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря* **2**, 122–130.

Бурдиян, Н.В., 2022. Распределение анаэробных бактерий в донных осадках в зависимости от окислительно-восстановительных условий и глубины (на примере прибрежной акватории Севастополя, Крым, Чёрное море). *Актуальные вопросы биологической физики и химии* **7** (3), 511–516.

Водовский, Н.Б., 2016. Особенности бентофауны в районах ликвидированных поисково-оценочных скважин в Северном Каспии. *Труды Каспийского филиала ИО РАН* **1**, 167–181.

Дзержинская, И.С., 2008. Питательные среды для выделения и культивирования микроорганизмов. Издательство АГТУ, Астрахань, Россия, 348 с.

Идрисова, Д.Т., Жумадилова, Ж.Ш., Бекенова, У.С., Изимбет, А.П., Шорабаев, Е.Ж., 2016. Микробиологическое исследование состояния северо-восточной части Каспия в весенний период. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований* **10**, 249–252.

Исакова, В.В., 2009. Антропогенные загрязнения природных геосистем Северного Каспия. *Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность* **1**, 82–84.

Колотова, О.В., Соколова, И.В., Владимцева, И.В., Шмелева, Е.О., Водовский, Н.Б., 2017. Бактериальные сообщества пелагиали и донных отложений Северного Каспия в 2015–2016 гг. *Юг России: экология, развитие* **12** (4), 120–137.

Курапов, А.А., Ушивцев, В.Б., Водовский, Н.Б., Колмыков, Е.В., 2016. Обоснование использования стационарных донных станций для мониторинга состояния и загрязнения морской среды и биоты Северного Каспия. *Труды Каспийского филиала ИО РАН* **1**, 248–259.

Лялин, В.С., Зверева, И.Г., Никифорова, Н.Г., 2010. Статистика: теория и практика в Excel: учебное пособие для вузов. Финансы и статистика, Инфра-М, Москва, Россия, 448 с.

Менькова, А.В., Баубекова, Д.Г., Дьякова, С.А., Галяутдинова, Е.Р.,2019. Мониторинг углеводородокисляющих бактерий воды и донных отложений на лицензированном участке «Северный». *Материалы VII научно-практической конференции с международным участием «Проблемы сохранения экосистемы Каспия в условиях освоения нефтегазовых месторождений».* Астрахань, Россия, 100–104.

Нетрусов, А.И., 2005. Практикум по микробиологии. Академия, Москва, Россия, 608 с.

Новиков, Д.А., Новочадов, В.В., 2005. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте (типовые случаи). Издательство ВолГМУ, Волгоград, Россия, 84 с.

Павлова, М.Д., Асатурова, А.М., Козицын, А.Е., 2021. Форма клеток бактерий. Некоторые особенности ультраструктуры, эволюции и экологии. *Журнал общей биологии* **82** (4), 270–282.

Романова, Н.Д., Сажин, А.Ф., 2010. Взаимосвязь между объемом бактериальных клеток и содержанием в них углерода. *Океанология* **50** (4), 556–565.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем, 1992. Абакумов, В.А. (ред.). Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, Россия, 317 с.

Теппер, Е.З., 2004. Практикум по микробиологии. Дрофа, Москва, Россия, 256 с.

Умербаева, Р.И., Саркисян, Н.А., Зубанов, С.А., Исмагулова, А.Л., 2011. Динамика планктонных и бентосных сообществ в районе месторождения им. Ю. Корчагина на Северном Каспии. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе* **10**, 48–54.

Умербаева, Р.И., Курапов, А.А., Колмыков, Е.В., Курманбаева, А.Р., 2019. Формирование сообществ обрастаний на донных станциях, установленных в Северном Каспии. *Астраханский вестник экологического образования* **6** (54), 142–149.

Ушивцев, В.Б., Водовский, Н.Б., Галактионова, М.Л., Курапов, А.А., Монахов, С.К., 2008. Экологические и экономические предпосылки к созданию на акватории Северного Каспия искусственных рифовых зон. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе* **5**, 78–83.

Ушивцев, В.Б., Водовский, Н.Б., Гераскин, П.П., 2017. Природоподобная биотехнология развития функциональности водных экосиситем Каспийского моря. *Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность»*. Севастополь, Россия, 1410–1413.

Hoff, K.A., 1993. Total and specific bacterial counts by simultaneous staining with DAPI and flourochrome-labeled antibodies. In: Kemp, P.F. (ed.), *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 149–154.

References

Akhmedova, G.A., Ushivtsev, V.B., Monakhova, G.A., Galaktionova, M.L., 2011a. Formirovanie donnoi fauny v Severnom i Srednem Kaspii v raione ustanovki iskusstvennyh rifovyh modulei [Formation of bottom fauna in the Northern and Middle Caspian Sea in the area of artificial reef module installation]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki [Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences]* **3** (16), 40–43. (In Russian).

Akhmedova, G.A., Ushivtsev, V.B., Gasangadzhieva, A.G., 2011b. Bioresursnyi potencial i osobennosti bioprodukcionnyh vozmozhnostei iskusstvennyh biotekhnicheskih konstrukcii v usloviyah Severnogo i srednego Kaspiya [Bioresource potential and features of bioproductive capabilities of artificial biotechnical structures in the conditions of the Northern and Middle Caspian Sea]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic Online Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University]* **71**, 510–523. (In Russian).

Baubekova, D.G., Proskurina, V.V., Voronina, E.A., 2022. Vliyanie prirodnyh faktorov na chislennost' saprotrofnyh i nefteokislyayushchih bakterii v severnoi chasti Kaspiiskogo morya [Influence of natural factors on the abundance of saprotrophic and oil-oxidizing bacteria in the northern part of the Caspian Sea]. Materialy X mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii molodyh uchenyh i specialistov «Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya rybohozyaistvennogo kompleksa» *[Proceedings of the X*

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists «Current Problems and Prospects for the Development of the Fishery Complex»). Moscow, Russia, 260–263. (In Russian).

Burdiyan, N.V., Alemov, S.V., 2020. Anaerobnye bakterii v pribrezhnyh nanosah buhty Troickoi (Sevastopol', Chernoe more) [Anaerobic bacteria in littoral drifts of the Troitskaya Bay (Sevastopol, Black Sea)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya [Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones of the Sea]* **2**, 122–130. (In Russian).

Burdiyan, N.V., 2022. Raspredelenie anaerobnyh bakterii v donnyh osadkah v zavisimosti ot okislitel'no-vosstanovitel'nyh uslovii i glubiny (na primere pribrezhnoi akvatorii Sevastopolya, Krym, Chyornoe more) [Distribution of anaerobic bacteria in the bottom sediments depending on the redox conditions and the depth (on the example of the coastal water area of Sevastopol, Crimea, Black Sea)]. *Aktual'nye voprosy biologicheskoj fiziki i himii [Current Issues of Biological Physics and Chemistry]* **7** (3), 511–516. (In Russian).

Dzerzhinskaya, I.S., 2008. Pitatel'nye sredy dlya vydeleniya i kul'tivirovaniya mikroorganizmov [Nutrient media for the isolation and cultivation of microorganisms]. Publishing House of the Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, 348 p. (In Russian).

Hoff, K.A., 1993. Total and specific bacterial counts by simultaneous staining with DAPI and flourochrome-labeled antibodies. In: Kemp, P.F. (ed.), *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 149–154.

Idrisova, D.T., Zhumadilova, Zh.Sh., Bekenova, U.S., Izimbet, A.P., Shorabaev, E.Zh., 2016. Mikrobiologicheskoe issledovanie sostoyaniya severo-vostochnoi chasti Kaspiya v vesennii period [Microbiological study of the state of the northeastern part of the Caspian Sea in the spring period]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanii* [*International Journal of Applied and Fundamental Research]* **10**, 249–252. (In Russian).

Isakova, V.V., 2009. Antropogennye zagryazneniya prirodnyh geosistem Severnogo Kaspiya [Anthropogenic pollutions of natural geosystems of the Northern Caspian Sea]. *Neftegazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost'* [*Oil and Gas Technologies and Environmental Safety]* **1**, 82–84. (In Russian).

Kolotova, O.V., Sokolova, I.V., Vladimtseva, I.V., Shmeleva, E.O., Vodovsky N.B., 2017. Bakterial'nye soobshchestva pelagiali i donnyh otlozhenii Severnogo Kaspiya v 2015–2016 gg. [Bacterial communities of the pelagic zone and bottom sediments of the Northern Caspian Sea in 2015–2016]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie [Southern Russia: Ecology and Development]* **12** (4), 120–137. (In Russian).

Kurapov, A.A., Ushivtsev, V.B., Vodovsky, N.B., Kolmykov, E.V., 2016. Obosnovanie ispol'zovaniya stacionarnyh donnyh stancii dlya monitoringa sostoyaniya i zagryazneniya morskoi sredy i bioty Severnogo Kaspiya [Justification for the use of stationary bottom stations for monitoring of the state and pollution of the marine environment and biota of the Northern Caspian Sea]. *Trudy Kaspijskogo filiala IO RAN [Proceedings of the Caspian Branch of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences]* **1**, 248–259. (In Russian).

Lyalin, V.S., Zvereva, I.G., Nikiforova, N.G., 2010. Statistika: teoriya i praktika v Excel: uchebnoe posobie dlya vuzov [Statistics: Theory and Practice in Excel: A Textbook for Universities]. Finance and Statistics, Infra-M, Moscow, Russia, 448 p. (In Russian).

Menkova, A.V., Baubekova, D.G., Dyakova, S.A., Galyautdinova, E.R., 2019. Monitoring uglevodorodokislyayushchih bakterii vody i donnyh otlozhenii na licenzirovannom uchastke «Severnyi» [Monitoring of hydrocarbon-oxidizing bacteria in water and bottom sediments at the «Severny» licensed area]. *Materialy VII nauchno-prakticheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Problemy sohraneniya ekosistemy Kaspiya v usloviyah osvoeniya neftegazovyh mestorozhdenii»*

[Proceedings of the VII Scientific and Practical Conference with International Participation «Problems of Preserving the Caspian Ecosystem in the Context of Oil and Gas Field Development»]. Astrakhan, Russia, 100–104. (In Russian).

Netrusov, A.I., 2005. Praktikum po mikrobiologii [Workshop on microbiology]. Academy, Moscow, Russia, 608 p. (In Russian).

Novikov, D.A., Novochadov V.V., 2005. Statisticheskie metody v mediko-biologicheskom eksperimente (tipovye sluchai) [Statistical methods in biomedical experiment (typical cases)]. Publishing House of the Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia, 84 p. (In Russian).

Pavlova, M.D., Asaturova, A.M., Kozitsyn, A.E., 2021. Forma kletok bakterii. Nekotorye osobennosti ul'trastruktury, evolyucii i ekologii [Bacterial cell shape. Some features of ultrastructure, evolution, and ecology]. *Zhurnal obshchei biologii [Journal of General Biology]* **82** (4), 270–282. (In Russian).

Romanova, N.D., Sazhin, A.F., 2010. Vzaimosvyaz' mezhdu ob'emom bakterial'nyh kletok i soderzhaniem v nih ugleroda [Relationship between bacterial cell volume and carbon content in them]. *Okeanologiya [Oceanology]* **50** (4), 556–565. (In Russian).

Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnyh ekosistem [A guide on hydrobiological monitoring of fresh water ecosystems], 1992. Abakumov, V.A. (ed). Gidrometeoizdat, Saint Petersburg, Russia, 317 p. (In Russian).

Tepper, E.Z., 2004. Praktikum po mikrobiologii [Workshop on microbiology]. Drofa, Moscow, Russia, 256 p. (In Russian).

Umerbaeva, R.I., Sarkisyan, N.A., Zubanov, S.A., Ismagulova, A.L., 2011. Dinamika planktonnyh i bentosnyh soobshchestv v raione mestorozhdeniya im. Yu. Korchagina na Severnom Kaspii [Dynamics of planktonic and benthic communities in the area of the Yuri Korchagin field in the Northern Caspian Sea]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse* [*Environmental Protection in the Oil and Gas Industry]* **10**, 48–54. (In Russian).

Umerbaeva, R.I., Kurapov, A.A., Kolmykov, E.V., Kurmanbaeva, A.R., 2019. Formirovanie soobshchestv obrastanii na donnyh stanciyah, ustanovlennyh v Severnom Kaspii [Formation of fouling communities on bottom stations installed in the Northern Caspian Sea]. *Astrahanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education]* **6** (54), 142–149. (In Russian).

Ushivtsev, V.B., Vodovsky, N.B., Galaktionova, M.L., Kurapov, A.A., Monakhov, S.K., 2008. Ekologicheskie i ekonomicheskie predposylki k sozdaniyu na akvatorii Severnogo Kaspiya iskusstvennyh rifovyh zon [Ecological and economic prerequisites for the creation of artificial reef zones in the water area of the Northern Caspian Sea]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse* [*Environmental Protection in the Oil and Gas Industry]* **5**, 78–83. (In Russian).

Ushivtsev, V.B., Vodovsky, N.B., Geraskin, P.P., 2017. Prirodopodobnaya biotekhnologiya razvitiya funkcional'nosti vodnyh ekosisitem Kaspiiskogo morya [Nature-like biotechnology for the development of functionality of aquatic ecosystems of the Caspian Sea]. *Sbornik statei po materialam nauchno-prakticheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'» [Collection of articles based on the materials of the scientific and practical conference with international participation «Ecological, Industrial and Energy Security»].* Sevastopol, Russia, 1410–1413. (In Russian).

Vodovsky, N.B., 2016. Osobennosti bentofauny v raionah likvidirovannyh poiskovo-ocenochnyh skvazhin v Severnom Kaspii [The features of benthic fauna in areas of decommissioned prospecting wells in the Northern Caspian Sea]. *Trudy Kaspiiskogo filiala IO RAN [Proceedings of the Caspian Branch of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences]* **1**, 167–181. (In Russian).