

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ СОВРЕМЕННЫХ МОРСКИХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНОГО МУРМАНА

Д. В. Пуговкин, И. С. Усягина, Н. С. Иванова, М. П. Венгер, Н. И. Мещеряков

Мурманский морской биологический институт РАН (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 июня 2025 г.

Для цитирования

Пуговкин Д. В., Усягина И. С., Иванова Н. С. и др. Количественные характеристики микробных сообществ современных морских донных отложений Восточного Мурмана // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4 — С. 605-618.

Исследовались количественные характеристики микробных сообществ осадочной толщи Зеленецкой и Ярнышной губ Баренцева моря, сформировавшейся в первой половине XX — начале XXI вв. В поверхностных отложениях Зеленецкой губы, подверженной антропогенному воздействию, количество бактерий выше, чем в Ярнышной губе. В колонках, отобранных из обеих губ, наблюдалась общая тенденция снижения численности микроорганизмов в вертикальном профиле. Изменение морфологической структуры бактериального сообщества в донных осадках, проявляющееся в разном соотношении групп кокковых и палочковидных форм бактерий, может быть связано с особенностями среды их обитания. Присутствие углеводородокисляющих бактерий в нижних слоях осадочной толщи Зеленецкой губы (до 31 см), датируемых периодом до начала активного хозяйственного освоения поселка Дальние Зеленцы (до 1906 г.), позволяет предположить, что нефтяные углеводороды способны проникать на значительную глубину донного осадка.

Ключевые слова: радионуклиды, донные отложения, Кольский полуостров, морское побережье, микробные сообщества.

Введение

Проблема исследований микробных сообществ донных отложений на разных глубинах остается актуальной в силу их меньшей изученности по сравнению с пелагическими формами и сообществами суши (в том числе в вечной мерзлоте). При этом на микробные сообщества донных осадков приходится 0,18—3,6% всей живой биомассы Земли [1; 2].

В большинстве работ акцент делается на изучение сообществ поверхностных слоев донных осадков до 10 см, а основным направлением исследований чаще всего является оценка воздействия антропогенных факторов на таксономическую структуру бактериоценозов [3—5].

Особый интерес представляют работы, описывающие распределение прокариотических микроорганизмов в толще грунта глубже 10 см [1; 6; 7]. Глобальные исследования микробных сообществ и их распределения по глубине отложений, проведенные в Атлантическом и Тихом океанах (более 40 станций), показали различия в их таксономическом составе в зависимости от глубины залегания [7]. Было показано, что распространение бактерий по глубине в толще донных отложений может ограничиваться концентрацией органического вещества и содержанием в среде кислорода. В то же время описаны бактерии, способные обитать в анаэробных условиях.

Нужно отметить, что большинство упомянутых выше работ, касающихся микробных сообществ морских донных осадков, проводилось с исполь-

зованием молекулярно-генетических методов исследования и в той или иной степени связано с определением особенностей их таксономической структуры в разных условиях. Однако не менее важна оценка численности и экологии сообществ микроорганизмов, выполняемая традиционными методами, которые позволяют в короткий срок и при меньших затратах оценить изменения, происходящие в них под воздействием различных антропогенных и природных факторов.

В настоящее время возрастает актуальность изучения экологии микробных сообществ в осадочной толще, сформировавшейся в последние сто лет. Этот период характеризуется активным освоением арктического региона с максимальной антропогенной нагрузкой на уязвимые и трудно восстанавливаемые донные биоты Арктики. Сравнительный анализ текущего состояния микробиома, включающий изучение количественных показателей (общей численности и биомассы бактерий), морфологических особенностей групп микроорганизмов и их физиологических свойств, с теми же показателями в ранних отложениях позволит существенно расширить представления об изменениях сообществ по мере накопления донного осадка.

Возраст современных («молодых») морских осадков определяют радиометрическим методом по избыточной активности природного радионуклида ^{210}Pb (период полураспада 22,3 года). Свинец-210 является частью цепи радиоактивного распада ^{238}U и образуется в осадочных породах *in situ* и в атмосфере. Атмосферный ^{210}Pb — продукт распада газа ^{222}Rn , который выделяется из почвы и донных отложений. В воздухе ^{222}Rn распадается до ^{210}Pb , который поступает на поверхность водоемов с влажными или сухими выпадениями [8]. Атмосферный ^{210}Pb быстро адсорбируется частицами взвеси и включается в донные отложения. Метод пригоден для датирования отложений, сформировавшихся в последние 100—150 лет и особенно востребован в исследованиях антропогенного загрязнения Мирового океана [9].

Исходя из изложенного, была определена цель настоящей работы: оценить количественные характеристики микробных сообществ в осадочной толще современных морских донных отложений. Исследование проводилось в Зеленецкой и Ярнышной губах Баренцева моря, которые испытывают различную антропогенную нагрузку. Для достижения поставленной цели были отобраны две колонки из разных районов, которые впоследствии разделяли

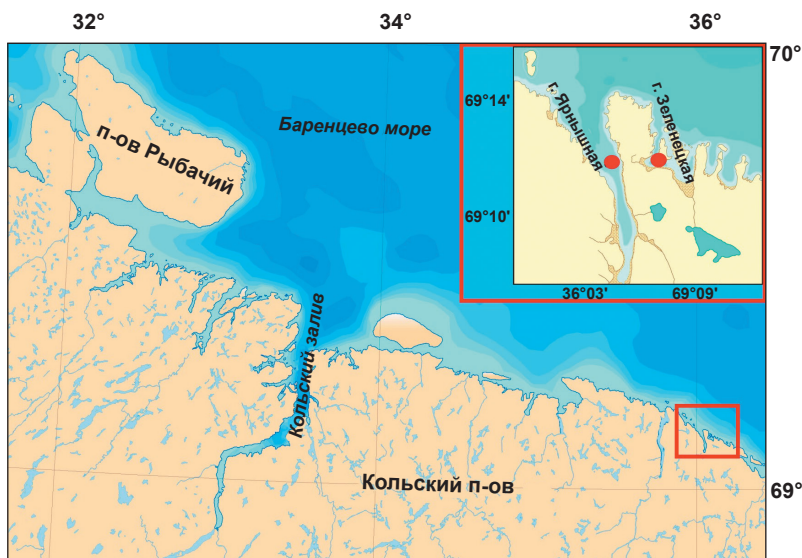


Рис. 1. Район работ и точки отбора проб
Fig. 1. Study area and sampling points

на слои с дискретностью по 2 см для определения возраста осадков. Выбор слоев осадка для отбора микробиологических образцов основан на средней скорости осадконакопления в районе исследования, определенной примерно за 100 лет в [10] на основе предположений дат их формирования и уровней антропогенного воздействия. Также для описания среды обитания микроорганизмов в этих же слоях определяли размерный состав частиц осадка, обводненность и содержание органического вещества.

Применение геохронологических подходов в микробиологических исследованиях открывает новые перспективы для оценки изменений микробных сообществ во времени и пространстве. На Кольском полуострове исследование микроорганизмов в вертикальном профиле отложений проводится впервые. Полученные результаты могут быть полезны при реконструкции антропогенного воздействия на морские экосистемы и организации мониторинга современного состояния арктических морей. Поскольку количественные показатели микробного сообщества являются важным индикатором изменений окружающей среды, настоящее исследование закладывает методологическую основу для дальнейшего изучения взаимодействия микробных сообществ с окружающей средой, в том числе в арктическом регионе, в условиях изменяющегося климата.

Материалы и методы

Район работ. Пробы отбирали в береговой экспедиции Мурманского морского биологического института (ММБИ) РАН в Зеленецкой губе (бухте Оскара) и Ярнышной губе Баренцева моря в августе 2024 г. (рис. 1). Океанографические особенности района описаны в [11], где отмечается разная степень антропогенной нагрузки в них. В Зеленецкой губе развита туристическая и причальная ин-

фраструктура, в летнее время есть регулярное судоходство (в основном маломерные суда). Бассейн Ярнышной губы испытывает меньшее антропогенное воздействие.

Зеленецкая губа — мелководный залив закрытого типа с максимальными глубинами до 20 м (бухта Оскара). Берега залива представлены валунными и песчаными пляжами. На сублиторали преобладают пелиты с примесью алевроитов (в основном крупных). В котловине бухты Оскара, где отбирали отложения, доминирует крупный алевроит с примесью пелита [10].

Ярнышная губа — залив открытого типа с обрывистыми скалистыми берегами и глубинами до 30 м. Залив далеко вдаётся в материк. Донные отложения оси залива представлены мелкодисперсным материалом, преимущественно состоящим из пелита с равной долей примеси мелкого и крупного алевроита [10].

В Мурманском прибрежье особенности современного седиментогенеза определяются геолого-геоморфологическим строением береговой зоны, абразионными и гравитационными процессами и речным стоком [12; 13]. По условиям седиментации Ярнышная и Зеленецкая губы относятся к типичным краевым бассейнам Восточного Мурмана, для которых характерно монотонное осадконакопление. Средняя скорость осадконакопления в данных бассейнах составляет 0,15—0,17 см/год, варьируя в узком диапазоне значений около 0,1 см/год [10], что подтверждает монотонность осадконакопления в последнем столетии.

Колонки донных отложений отбирали с борта лодки ПВХ при помощи гравитационной трубки ГОИН-1.5 в точках с координатами 69,118552° с. ш., 36,073408° в. д. на глубине 13 м (Зеленецкая губа, бухта Оскара) и 69,111662° с. ш., 36,049827° в. д. (Ярнышная губа) на глубине 26 м.

Пробы для микробиологических исследований отбирали с помощью одноразового шприца ($V = 10 \text{ см}^3$) сразу после извлечения вкладыша с донными отложениями из трубки ГОИН-1.5 с соблюдением правил асептики. Чтобы избежать дополнительной контаминации исследуемого материала от стенок вкладыша, извлечение материала проводили из сердцевин вскрытой колонки. В колонке из Зеленецкой губы материал отбирали в слоях 4—8, 14—18, 26—31 см, в колонке из Ярнышной губы — в слоях 2—6, 12—16 и 22—26 см. После этого для определения возраста осадочных слоев колонку разрезали на слои с дискретностью по 2 см.

Методика проведения измерений радионуклидов. Радиометрические измерения проводили на полупроводниковом широкополосном германиевом детекторе планарного типа BE5030 (Canberra, США) со свинцовой защитой («Аспект», Россия). Обработка спектров и идентификация изотопов выполнены в программе Genie-2000 (Canberra, версия 3.3). Результаты измерений природных радионуклидов ^{210}Pb и ^{226}Ra и антропогенного ^{137}Cs приведены

на сухой вес и рассчитаны на дату сбора образцов (28.08.2024). Удельную активность ^{210}Pb ($\Sigma^{210}\text{Pb}$) определяли по его гамма-линии 46,5 кэВ ($^{210}\text{Pb}_{\text{общ}}$). Для расчета активности избыточного ^{210}Pb , поступившего с атмосферными выпадениями ($^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$), из значений $\Sigma^{210}\text{Pb}$ была вычтена активность фонового ^{210}Pb , образующегося *in situ* в грунте, определенная по основным линиям ^{226}Ra . Количественное определение ^{226}Ra проведено по линиям ^{214}Pb (295,2 и 351,9 кэВ) и ^{214}Bi (1120 кэВ). Удельную активность ^{137}Cs определяли по линии 661,7 кэВ.

Календарный возраст слоев донных отложений рассчитывали с помощью модели CFCS, которая доказала свою надежность в стабильных условиях с равномерными темпами накопления осадков [14]. Эта модель одновременно включает в себя гипотезу модели постоянного потока (CF) о постоянном притоке $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ к поверхности отложений и гипотезу модели постоянной седиментации (CS) о постоянной скорости накопления массы осадка [8].

Календарный возраст слоев донных отложений t (лет) рассчитывали согласно стандартным методическим рекомендациям [14] по отношению

$$t = \frac{m_i}{r},$$

где m_i — «массовая глубина», г/см²; r — скорость накопления массы осадка, г/(см²·год), которую определяли как

$$r = -\lambda/b,$$

где λ — постоянная распада ^{210}Pb , равная 0,03118 год⁻¹; b — коэффициент наклона прямой, описывающей снижение логарифма $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ($\ln C_i$) в зависимости от «массовой глубины», рассчитанный по формуле $\ln C_i = \ln C_0 + bm_i$, где $\ln C_0$ — логарифм $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ в слое 0—2 см.

Скорость седиментации рассчитывали по формуле

$$s = -\lambda/b,$$

где b — коэффициент наклона прямой, описывающей снижение логарифма $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ($\ln C_i$) в зависимости от глубины разреза z_i , рассчитанный по формуле $\ln C_i = \ln C_0 + bz_i$.

Для проверки датирования использовали независимый геохронологический маркер ^{137}Cs . Пики антропогенных радионуклидов в донных отложениях сопоставляли с конкретными событиями в истории поступления радиоактивных изотопов в Баренцево море — с атмосферными выпадениями после испытаний ядерного оружия на Новой Земле, максимум которых пришелся на 1963 г. [15].

Гранулометрический анализ слоев донного осадка выполнен по методике, разработанной во ВНИИОкеангеология [16]. Из-за значительного содержания органики в исследуемых донных отложениях в расчеты была введена поправка. Из общей массы навески вычитали вес органических соединений, что позволило уточнить данные по терригенному осадконакоплению в районе работ. Массу органи-

ческих веществ определяли по массе потерь после прокалывания (ППП, %). Из каждой пробы отбирали аликвоту, которую прокалывали в муфельной печи при температуре 450°C до постоянной массы [17].

Методика микробиологических исследований. Учет общего числа бактерий (ОЧБ) и особенностей морфологии бактерий выполняли методом эпифлуоресцентной микроскопии с использованием флуорохрома DAPI [18] на черных (нефлуоресцирующих) ядерных фильтрах с диаметром пор 0,2 мкм при увеличении 1000.

Для определения численности культивируемых гетеротрофных бактерий использовали метод предельных разведений с применением модифицированной для морских вод жидкой среды Зобелла 2216E [19; 20].

Для определения количества углеводородоксиляющих бактерий (УОБ) использовали жидкую среду ММС с дизельным топливом в качестве единственного источника углерода и энергии [21].

Общую численность и количество сапрофитных бактерий пересчитывали на 1 г сырого веса донных отложений. Определение аммонифицирующей способности бактерий в среде проводили стандартным методом с использованием тест-систем (красная лакмусовая бумага). Способность бактерий продуцировать сероводород определяли также при помощи тест-систем с уксуснокислым свинцом.

При исследовании бактериальных сообществ гетеротрофных бактерий, особенно при выделении бактерий различных трофических групп и узкоспеци-

ализированных микроорганизмов с использованием питательных сред, необходимо учитывать, что далеко не все представители сообщества культивируются на питательных средах [22]. Однако соотношение общей численности и численности культивируемых бактерий позволяет описать некоторые особенности среды, в которой они обитают. Например, данное соотношение легло в основы определения качества среды (водной) по микробиологическим показателям. Увеличить «продуктивность» питательных сред возможно, изменяя и модифицируя их состав [23; 24]. Поэтому в настоящей работе использовались не стандартные питательные среды, рекомендованные для санитарной и медицинской микробиологии, а те, что показали свою эффективность в более ранних работах [19; 20; 25].

Результаты исследования

Удельная активность радионуклидов в осадочных слоях колонок и календарный возраст донных отложений. Результаты радиометрических измерений и определения возраста осадочных слоев в колонках донных отложений представлены в табл. 1. Диапазон удельной активности $\Sigma^{210}\text{Pb}$ в слоях составляет 14,1—295,0 Бк/кг, ^{226}Ra — 13,8—27,4 Бк/кг, $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ — 4,6—268,9 Бк/кг, ^{137}Cs — < МДА—7,7 Бк/кг (МДА — минимальная детектируемая активность радионуклида).

Результаты измерений показали, что в верхнем полужидком слое обеих колонок удельные активности $\Sigma^{210}\text{Pb}$ и $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ имеют максимальные значения.

Таблица 1. Результаты измерения активности изотопов $\Sigma^{210}\text{Pb}$, ^{226}Ra , $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$, ^{137}Cs и (Бк/кг) для отдельных слоев колонок донных отложений из Зеленецкой и Ярнышной губ с указанием стандартного отклонения δ и контроль возрастной модели CFCS по отношению $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$

Table 1. Results of measuring the activity of the isotopes $\Sigma^{210}\text{Pb}$, ^{226}Ra , $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$, ^{137}Cs and (Bq/kg) for individual layers of sediment columns from Zelenetskaya and Yarnyshnaya bays, indicating the standard deviation δ and control of the CFCS age model with respect to $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$

Слой донных отложений, см	Массовая глубина, г/см ²	$\Sigma^{210}\text{Pb} \pm \delta$ ¹	$^{226}\text{Ra} \pm \delta$	$^{210}\text{Pb}_{\text{изб}} \pm \delta$	$^{137}\text{Cs} \pm \delta$	$^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$	$t^2 \pm u(t)$
Зеленецкая губа							
0—2	0,5	205,0 ± 14,6	14,0 ± 4,7	191,0 ± 15,3	< МДА	—	2022 ± 2
2—4	1,8	169,0 ± 17,9	16,9 ± 13,8	152,1 ± 22,6	4,3 ± 0,7	0,03	2015 ± 5
4—6 ³	3,6	155,6 ± 12,0	13,8 ± 3,9	141,8 ± 12,6	2,6 ± 0,5	0,02	2005 ± 6
6—8 ³	5,0	80,6 ± 12,7	22,3 ± 3,4	58,3 ± 13,1	1,8 ± 0,9	0,03	1997 ± 5
8—10	6,3	61,9 ± 10,3	19,2 ± 3,3	42,7 ± 10,8	2,0 ± 0,5	0,05	1990 ± 4
10—12	7,7	71,5 ± 11,7	17,1 ± 3,2	54,4 ± 12,1	2,8 ± 0,6	0,05	1981 ± 5
12—14	9,3	48,2 ± 6,9	18,2 ± 2,9	30,0 ± 7,5	7,0 ± 0,9	0,23	1972 ± 6
14—16 ³	11,0	44,6 ± 10,7	18,2 ± 3,2	26,4 ± 11,2	2,7 ± 1,3	0,10	1963 ± 6
16—18 ³	13,0	48,9 ± 7,6	18,9 ± 2,9	30,0 ± 8,1	< МДА	—	1952 ± 7
18—20	15,3	31,6 ± 3,7	15,2 ± 3,2	16,4 ± 4,9	< МДА	—	1939 ± 8

Окончание табл. 1

Слой донных отложений, см	Массовая глубина, г/см ²	$\Sigma^{210}\text{Pb} \pm \delta^1$	$^{226}\text{Ra} \pm \delta$	$^{210}\text{Pb}_{\text{изб}} \pm \delta$	$^{137}\text{Cs} \pm \delta$	$^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$	$t^2 \pm u(t)$
20—22	17,3	23,4 ± 3,5	15,2 ± 3,4	8,2 ± 4,9	< МДА	—	1927 ± 7
22—24	19,3	22,2 ± 4,1	15,9 ± 2,7	6,3 ± 4,9	< МДА	—	1916 ± 7
24—26	21,1	26,2 ± 4,6	21,6 ± 2,9	4,6 ± 5,4	< МДА	—	1906 ± 6
26—31 ³	21,9	14,1 ± 3,4	18,0 ± 2,0	< 0	< МДА	—	< 1906
Ярнышная губа							
0—2	0,3	295,0 ± 21,0	26,1 ± 60,7	268,9 ± 64,2	< МДА	—	2023 ± 1
2—4 ³	0,9	205,8 ± 16,7	32,2 ± 8,2	192,8 ± 18,6	3,2 ± 1,4	0,02	2020 ± 2
4—6 ³	1,5	221,0 ± 18,8	24,8 ± 5,9	196,2 ± 19,7	7,7 ± 1,7	0,03	2017 ± 2
6—8	2,4	237,0 ± 20,8	24,8 ± 5,3	212,2 ± 21,5	5,1 ± 1,8	0,02	2013 ± 2
8—10	3,6	121,4 ± 23,0	22,6 ± 5,9	98,8 ± 23,7	7,1 ± 2,7	0,06	2007 ± 3
10—12	5,5	80,8 ± 7,6	23,7 ± 3,1	57,1 ± 8,2	3,5 ± 0,7	0,04	1997 ± 5
12—14 ³	7,5	62,2 ± 10,5	21,9 ± 3,3	40,3 ± 11,0	3,0 ± 0,7	0,05	1987 ± 5
14—16 ³	9,2	76,5 ± 7,6	24,7 ± 3,5	51,8 ± 8,4	2,9 ± 0,7	0,04	1979 ± 5
16—18	10,5	107,0 ± 10,3	27,4 ± 5,0	79,6 ± 11,4	3,0 ± 1,0	0,03	1973 ± 3
18—20	11,5	95,4 ± 13,6	25,3 ± 4,5	70,1 ± 14,3	3,7 ± 0,9	0,04	1968 ± 3
20—22	13,0	57,5 ± 5,7	21,1 ± 2,6	36,4 ± 6,3	2,8 ± 0,5	0,05	1960 ± 4
22—24 ³	14,4	46,9 ± 7,2	16,8 ± 2,5	30,1 ± 7,6	< МДА	—	1952 ± 5
24—26 ³	16,5	40,6 ± 4,2	22,1 ± 3,1	18,5 ± 5,2	< МДА	—	1943 ± 5
26—28	17,5	32,8 ± 4,8	24,8 ± 2,5	8,0 ± 5,4	< МДА	—	1938 ± 3

¹ Неопределенность измерений, Бк/кг.

Measurement uncertainty, Bq/kg.

² Календарная дата образования отдельного слоя ± неопределенность, лет.

Calendar date of formation of a separate layer horizon ± uncertainty, years.

³ Слои, в которых отбирали пробы на микробиологический анализ.

Layers in which samples were taken for microbiological analysis.

По профилям эти показатели снижаются с глубиной, что свидетельствует о стабильности седиментации в районах исследования. Перечисленные факторы, а также достижение равновесия между фоновым ^{210}Pb и $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ в слое 24—26 см в Зеленецкой губе и 26—28 см в Ярнышной губе подтвердили наши предположения о том, что мы работаем с «молодыми» осадками (~100—150 лет), и позволили провести датирование осадочной толщи.

Согласно расчетам, в Ярнышной губе скорость аккумуляции массы отложений r составляет $0,202 \pm 0,025$ г/(см²·год), в Зеленецкой губе — $0,178 \pm 0,011$ г/(см²·год). Линейная скорость осадконакопления s в Ярнышной губе составляет $0,284 \pm 0,035$ см/год, в Зеленецкой губе — $0,207 \pm 0,013$ см/год.

Гранулометрический анализ. Вскрытые донные отложения Зеленецкой губы представлены преимущественно крупным алевритом (40,0—45,7%) и разномзернистым песком (37,8—43,7%) с преобладанием мелкозернистой фракции (рис. 2).

Доля пелита варьирует от 9,4% до 13,9%, при этом содержание гравия возрастает в нижних слоях керна, достигая 6% в слое 30—31 см.

В Ярнышной губе в исследованных слоях колонки преобладают алевритовые фракции (49,9—56,4%), содержание песка составляет 24,2—33,3%, пелита — 11,1—15,3%, во всех слоях присутствуют включения гравия (2—4%). В обеих колонках при увеличении глубины залегания исследуемого слоя керна наблюдалось уменьшение обводненности и увеличение плотности (см. табл. 2). Содержание органического

вещества, косвенно определяемое по потерям при прокаливании, уменьшалось от верхних слоев к нижним.

Микробиологические исследования. Микробиологические показатели в колонке из Зеленецкой губы анализировали в слоях 4—8, 14—18, 26—31 см.

Общая численность бактерий варьирует в диапазоне от $5,1 \cdot 10^7$ до $1,9 \cdot 10^8$ кл./г грунта в зависимости от глубины залегания исследуемого слоя в осадочной толще, максимальная численность наблюдалась в слое 4—8 см, минимальная — в слое 26—31 см (рис. 3). В двух нижних слоях значения общей численности были значительно ниже, чем в верхнем, и укладываются в величины одного порядка.

Размерно-морфологическая структура бактериальных сообществ донных отложений Зеленецкой губы не отличалась разнообразием (см. рис. 3). В основном сообщество представлено мелкими клетками (≥ 2 мкм) палочковидной и кокковой форм. Преобладали палочковидные формы. Их соотношение с кокками изменялось в зависимости от исследуемого слоя осадка. Доля палочковых форм бактерий уменьшается от верхних слоев к нижним от 77% до 54%, доля кокковых форм, наоборот, увеличивается от 23% до 46%.

Количество культивируемых гетеротрофных бактерий изменялось аналогично общей численности бактерий, т. е. наблюдалось их уменьшение по профилю от поверхности к более глубоким слоям. Однако, в отличие от ОЧБ, в слоях 4—8 и 14—18 см численность культивируемых гетеротрофов (клеток) не различалась и составила 60,0 тыс. кл./г, а в самом глубоком слое данный показатель снизился до 2,5 тыс. кл./г.

При близких значениях численности культивируемых гетеротрофов и значительном различии в ОЧБ в слоях осадков 4—8 и 14—18 см их доля в бактериальных сообществах указанных слоев осадков различалась. Так,

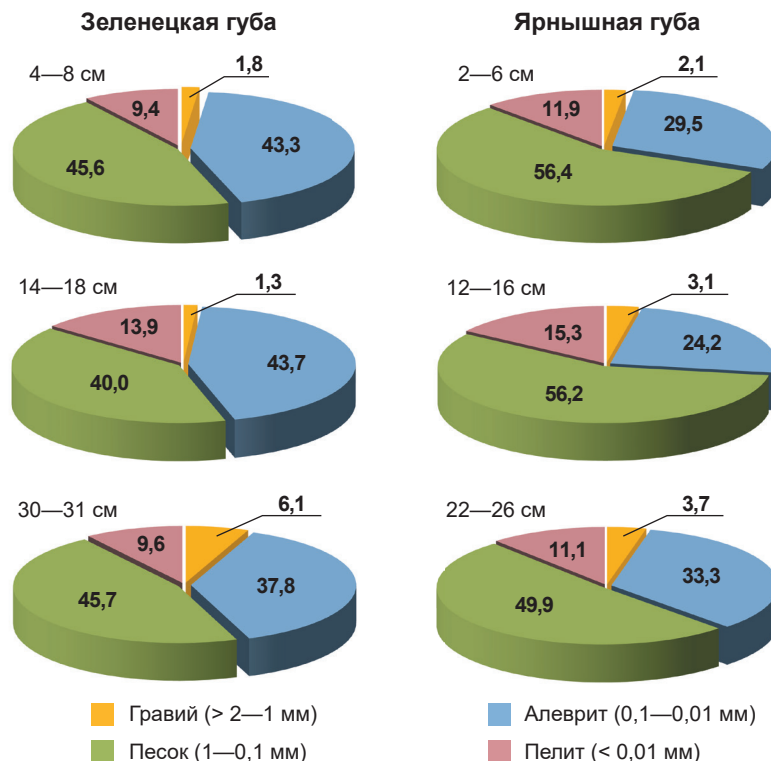


Рис. 2. Гранулометрический состав донных осадков в Зеленецкой и Ярнышной губах, % общего количества

Fig. 2. Granulometric composition of bottom sediments in Zelenetskaya and Yarnyshnaya Bays, % of the total amount

Таблица 2. Характеристика донных отложений

Table 2. Characteristics of bottom sediments

Место отбора проб	Слой донных отложений, см	Потери при прокаливании, %	Обводненность, %	Плотность, г/м ³
Зеленецкая губа	4—8	7,06	47,4	0,7
	14—18	6,74	43,9	0,8
	26—31	5,46	40,6	0,9
Ярнышная губа	2—6	5,65	47,9	0,3
	12—16	4,13	33,1	0,4
	22—26	2,67	25,1	0,6

в поверхностном слое она составила 0,03%, а в слое 14—18 см — 0,08% общей численности бактерий. В более глубоких слоях доля культивируемых бактерий составляла 0,0043% и 0,0049%.

На глубине от 14 до 31 см были обнаружены углеводородокисляющие бактерии. Их количество относительно ОЧБ было невелико и составляло от 0,25 до 0,5 тыс. кл./г осадка (рис. 3).

Во всех слоях донных отложений были обнаружены аммонифицирующая активность бактерий (4—31 см) и сероводород (4—8 см) (табл. 3).

Микробиологические показатели в колонке из Ярнышной губы анализировали в слоях 2—6, 12—16 и 22—26 см. Общая численность бактериальных клеток в исследуемых образцах изменялась в пределах

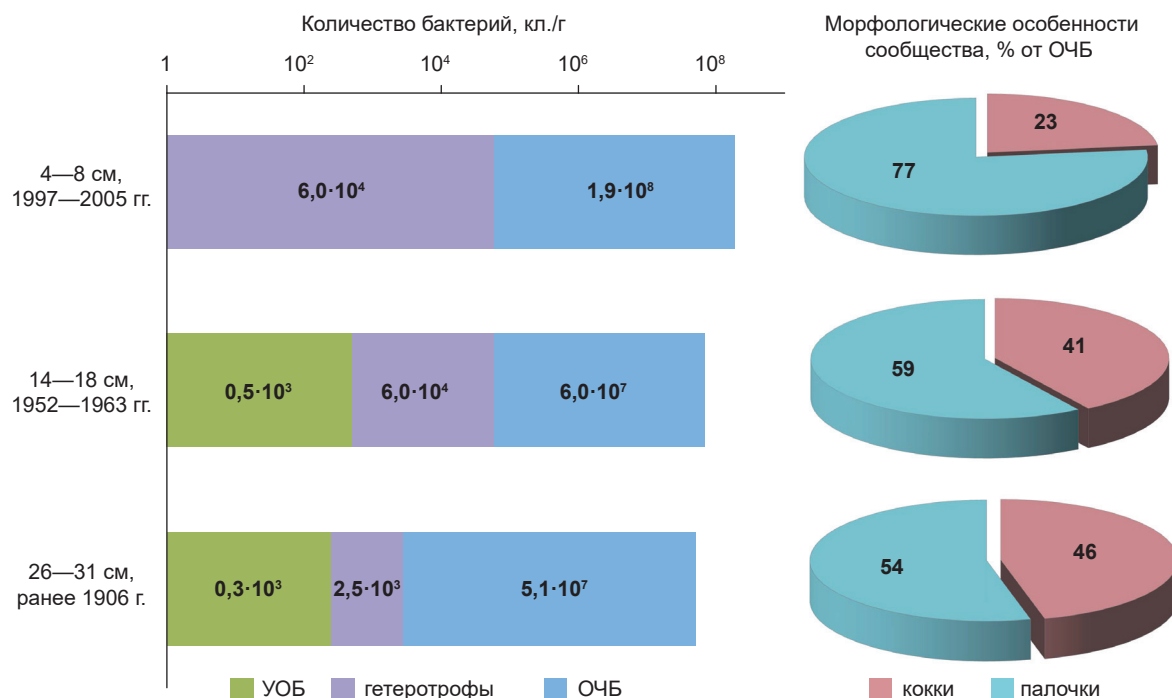


Рис. 3. Распределение численности бактерий на разной глубине донных отложений в Зеленецкой губе
Fig. 3. Distribution of bacterial abundance in different depths of bottom sediments in Zelenetskaya Bay

Таблица 3. Обнаружение аммонифицирующей активности бактерий и сероводорода в слоях морских донных отложений Зеленецкой губы

Table 3. Detection of the ammonifying activity of bacteria and hydrogen sulfide in the layers of marine sediments in Zelenetskaya Bay

Слой донных отложений, см	Аммонифицирующая активность	Сероводород
4—8	+	+
14—18	+	—
26—31	+	—

одного порядка от $7,2 \cdot 10^7$ кл./г до $1,1 \cdot 10^8$ кл./г. Максимальная численность выявлена в слое 12—16 см, минимальная — в слое 22—26 см (рис. 4).

С точки зрения морфологии бактериальное сообщество представлено мелкими клетками — кокками и палочками. Доля кокковых форм была равна или выше доли палочковидных форм (рис. 4). В осадочных слоях с увеличением глубины залегания также увеличивалась доля кокковых форм (с 35% до 45%). В слое 12—16 см отмечалось равное соотношение палочек и кокков в бактериальном сообществе.

Количество культивируемых бактерий в анализируемых слоях Ярнышной губы варьировало в пределах от 0,6 до 60 тыс. кл./г. Максимальное значение зафиксировано в слое 2—6 см, минимальное — в слое 12—16 см.

Угледородокисляющие бактерии в донных осадках в Ярнышной губе обнаружены не были. Во всех исследуемых слоях осадочной толщи Ярнышной губы за исключением слоя 22—26 см отмечены аммонифицирующая активность бактерий и сероводород (табл. 4).

Таблица 4. Обнаружение аммонифицирующей активности бактерий и сероводорода в слоях морских донных отложений Ярнышной губы

Table 4. Detection of the ammonifying activity of bacteria and hydrogen sulfide in the layers of marine sediments in Yarnyshnaya Bay

Слой донных отложений, см	Аммонифицирующая активность	Сероводород
2—6	+	+
12—16	+	+
22—26	+	—

Обсуждение

По результатам расчетов календарного возраста исследуемых колонок донных отложений установлено, что вскрытые осадочные толщи в точках отбора начали формироваться в первой половине XX в. Возраст нижнего слоя осадочной толщи из Ярнышной губы (26—28 см) датирован 1938 г. (87 лет), из Зеленецкой губы (24—26 см) — 1906 г. (118 лет). ^{137}Cs был обнаружен в слоях 2—22 см в колонке из

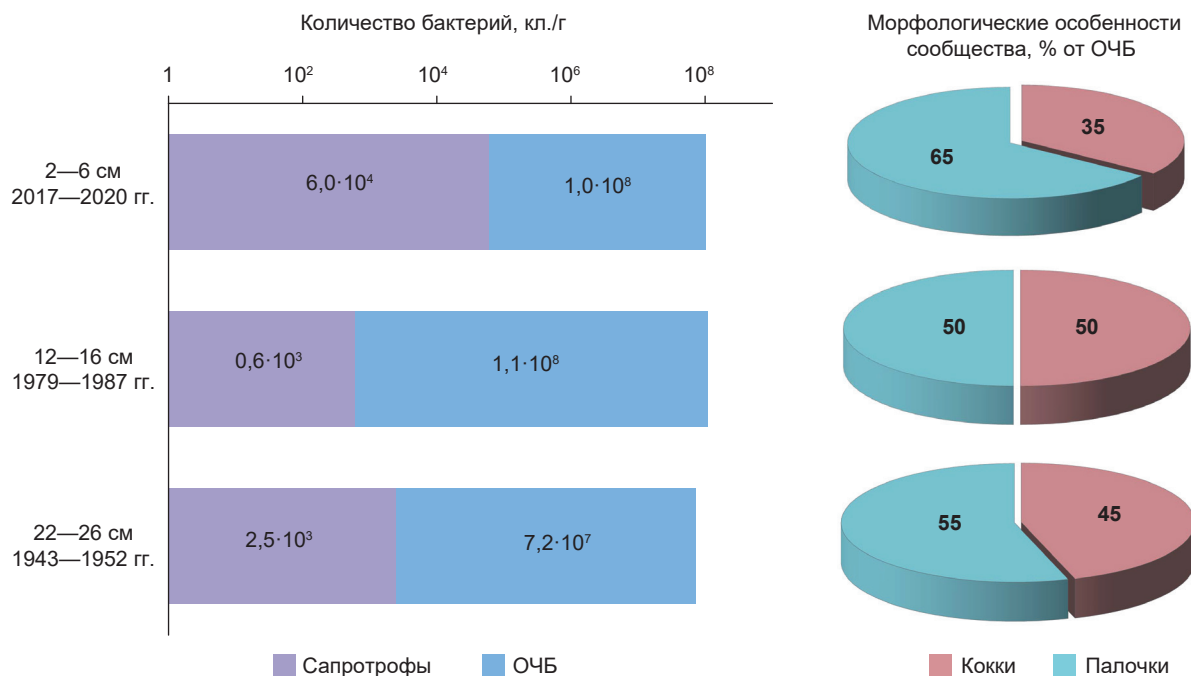


Рис. 4. Распределение численности бактерий на разной глубине донных отложений в Ярнышной губе
Fig. 4. Distribution of bacterial abundance at different depths of bottom sediments in Yarnyshnaya Bay

Ярнышной губы и 2—16 см в колонке из Зеленецкой губы (см. табл. 1). В профилях ^{137}Cs обеих колонок первое обнаружение радионуклида было в слоях, датированных по $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ периодом 1960—1963 гг. (см. табл. 1). На хронологические шкалы формирования донного осадка в Ярнышной и Зеленецкой губах с хорошим соответствием накладывается исторически зафиксированная дата повышения уровня ^{137}Cs в среде Баренцева моря — 1963 г., которая связана с атмосферными выпадениями радионуклидов после испытаний атомного оружия на архипелаге Новая Земля [15]. Точность верификации подтверждают выделенные в табл. 2 слои с повышенным запасом ^{137}Cs , которые определяются как максимальное соотношение $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ и улучшают датировку по $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ [26]. Полученные данные сопоставимы с результатами, полученными в 2023 г., что подтверждает правильность выбора слоев для отбора микробиологических образцов.

Исследование гранулометрического состава осадков свидетельствует о формировании донных отложений в условиях активного гидродинамического воздействия, связанного с мелководностью исследуемых бассейнов и влиянием ледового разноса. Это проявляется в преобладании алеврито-песчаных фракций, низком содержании пелитового материала, выносимого мористее, и в присутствии грубообломочных частиц. Некоторые различия в гранулометрическом составе могут быть обусловлены пространственной изменчивостью осадочного материала и особенностями условий осадконакопления в точках отбора проб.

Общая численность бактерий в слое до 10 см в обеих исследуемых колонках выше, чем описанная в литературных источниках ранее. Например, в районе архипелага Шпицберген ОЧБ составляла $0,2—3,1 \cdot 10^6$ кл./г [5]. Отдельно уточняется, что численность со временем увеличивалась в присутствии сырой нефти. Величины ОЧБ, сопоставимые с нашими данными, были получены в районах разведения атлантического лосося *Salmo salar* в Тасмании и достигали $2 \cdot 10^8—3 \cdot 10^9$ кл./г. [3]. В данном случае авторы связывали высокую численность бактерий с поступлением в среду органического вещества от рыбных ферм. Необходимо также отметить, что различия между полученными ранее и нашими результатами могут быть связаны как с особенностями среды, из которой отбирались пробы, так и с методическими подходами, применяющимися в исследованиях.

Полученные нами данные ОЧБ на разной глубине донных отложений приведены к содержанию клеток в 1 г сырой массы донных осадков. В литературе же в качестве единиц измерения численности бактерий используются как кл./г, так и кл./см³, что значительно затрудняет сравнение результатов. Несмотря на это, мы можем провести сравнительный анализ тенденции изменения численности бактерий (как общей, так и культивируемых гетеротрофов) по профилю отложений. Наибольшее значение ОЧБ характерно для верхних слоев колонок Зеленецкой и Ярнышной губ 4—8 см и 2—6 см соответственно. При сравнении значений более высокий показатель численности отмечен в поверхностном слое

отложений из подверженной антропогенному воздействию Зеленецкой губы. При этом и в Ярнышной губе, и в Зеленецкой губе в поверхностном слое он соответствовал величинам одного порядка.

С глубиной количество бактерий в обеих колонках уменьшается. Аналогичные результаты были получены в исследованиях прокариотических сообществ в осадочной толще 30-см донных отложений в районе побережья Норвегии и архипелага Шпицберген [6; 27]. Так как пробы отбирали в районах с близкими условиями среды, «горизонтальные» различия были незначительны, а вертикальные профили, напротив, характеризовались уменьшением количества клеток с увеличением глубины осадка. Было установлено преобладание в сообществе бактерий серного цикла — потенциальных сульфатредукторов.

В настоящей работе помимо ОЧБ также определялась и численность культивируемых бактерий. Наибольшее значение численности культивируемых бактерий аналогично ОЧБ характерно для верхних слоев колонок Зеленецкой и Ярнышной губ 4—8 см и 2—6 см соответственно. Более высокий показатель отмечен в подверженной антропогенному воздействию Зеленецкой губе. С глубиной число культивируемых бактерий снижалось в донных отложениях как Зеленецкой губы, так и Ярнышной губы. Однако характер этого снижения различался (см. рис. 3 и 4).

Количественные показатели бактериальных сообществ, определенные методом прямого счета и полученные в результате посева на питательные среды, не совпадают. ОЧБ более стабильный показатель, чем количество культивируемых микроорганизмов. Диапазон колебаний общей численности бактерий в разные сезоны года и под воздействием факторов среды обычно варьирует в пределах одного порядка (реже двух). Численность же культивируемых бактерий может изменяться в значительно более широких пределах. Именно поэтому количество культивируемых бактерий является показателем состояния окружающей среды. А это свойство микробных сообществ используется в целях мониторинга окружающей среды.

Одним из основным лимитирующих факторов, ограничивающим распространение бактерий, является органическое вещество, которое микроорганизмы используют в качестве субстрата. Поэтому уменьшение количества культивируемых гетеротрофов (как и ОЧБ) может быть связано с данным фактором. Косвенно об уменьшении органического вещества могут свидетельствовать потери при прокаливании при гранулометрическом анализе донных отложений (см. табл. 2). Кроме того, с продвижением вглубь грунта, как правило, происходит увеличение плотности отложений под действием своей массы [28], что может препятствовать поступлению воздуха в более глубокие слои грунта, создавая условия, близкие к анаэробным. Это затрудняет развитие бактерий и приводит к уменьшению их численности. Также снижению проникновения

растворенного органического вещества и кислорода в более глубокие слои способствует уменьшение их обводненности (см. табл. 2).

Доминирование тех или иных фракций может оказывать влияние на микробные сообщества донных отложений, так как размер частиц определяет доступность органического вещества в более глубокие слои. Мелкодисперсные отложения по сравнению с псефитами и псаммитами обладают меньшей водопроницаемостью, которая, как известно, снижается с уменьшением размера слагающих частиц (ГОСТ 25100-2020. Грунты, классификация). Таким образом, пелитово-алевритовый материал препятствует поступлению растворенного в воде органического вещества и кислорода в нижние слои осадочной толщи. Напротив, увеличение фракции песка и гравия облегчает аэрацию донных отложений.

В изучаемых бассейнах седиментации гранулометрический состав осадочной толщи однороден относительно осадочного столба. В нашем случае основу донных отложений составляют крупный алеврит и мелкозернистый песок. При этом зависимость количества бактерий от фракционного состава «молодых» осадков не обнаружена. Это позволяет предположить, что ключевым фактором, влияющим на вертикальное распределение микроорганизмов в донных отложениях Ярнышной и Зеленецкой губ, сформированных в XX—XXI вв., является уплотнение осадка с глубиной, а не его гранулометрические характеристики.

Углекислородфиксирующие бактерии были обнаружены только в отложениях Зеленецкой губы, наиболее подверженной антропогенной нагрузке, особенно в течение XX в., когда была развита портовая инфраструктура поселка Дальние Зеленцы (1930—1990-е годы). Их присутствие в донных отложениях, датируемых от начала до середины XX в., может свидетельствовать о наличии в среде нефтяных углеводородов. Ранее было показано, что валовое содержание нефтяных углеводородов в природной воде Зеленецкой губы соответствовало около 4 ПДК, а детальный их анализ указывал на преимущественно нефтяную природу алканов [29]. Нефтяные углеводороды были обнаружены также у макрофитов, обитающих в губе. Таким образом, в акватории имеется постоянный, но малоинтенсивный источник нефтяных алканов, вероятнее всего, связанный с водным транспортом.

Численность УОБ была невелика относительно ОЧБ и культивируемых гетеротрофов и не превышала сотен клеток в грамме донного осадка. Нефтяные углеводороды за счет механического перемешивания поверхностных отложений могут проникать в более глубокие слои донных отложений. Показано, что 70% нефтяных углеводородов в них сохранялось на глубине до 6 см [4]. Однако их часть со временем распространяется и в более глубокие слои (до 10 см). Наличие углекислородфиксирующих бактерий в донных осадках Зеленецкой губы в слое 26—

31 см косвенно может свидетельствовать о том, что нефтяные углеводороды способны проникать в более глубокие слои, являясь субстратом для части бактериального сообщества, которая может использовать углеводороды в качестве единственного источника углерода и энергии.

Отсутствие УОБ в поверхностном слое донного осадка Зеленецкой губы также может объясняться особенностями данного слоя. Из-за невысокой плотности он может размываться за счет движения водной массы (в том числе во время штормов либо в ходе приливно-отливного цикла). Кроме того, за счет осаждающейся взвеси происходит «обновление» верхнего слоя донного осадка. В то же время часть углеводородов просачивается в более старые слои, где накапливается и может служить субстратом для развития бактерий. А поскольку в донных осадках захораниваются в основном «тяжелые» фракции углеводородов, то количество бактерий, способных к их окислению, невелико.

Наличие в поверхностном слое донных отложений бактерий-аммонификаторов и особенно бактерий, способных продуцировать сероводород, было зафиксировано в разных участках Баренцева моря, в том числе в глубоководных высокоширотных районах [30]. Полученные в настоящей работе данные хорошо согласуются с литературными. Аммонифицирующая активность бактерий была нами также обнаружена в нижних слоях обеих колоннок, а это значит, что в осадочной толще происходит активное разложение органического вещества, накопленного в Зеленецкой губе с 1906 г., а в Ярнышной губе — с 1952 г.

Бактерии, способные продуцировать сероводород, обнаружены в Зеленецкой губе в поверхностном слое (4—8 см), в Ярнышной губе — в поверхностном (2—6 см) и среднем (12—16 см) слоях. Вероятно, это может быть связано с наличием в осадках локальных зон с условиями, близкими к анаэробным. Высказывалось предположение, что некоторые представители бактериального сообщества способны активно продуцировать сероводород на границе анаэробной и аэробной зон [30]. Предполагается, что наличие сероводорода может быть свидетельством активной сульфатредукции, происходящей в среде и также осуществляемой бактериями. Численность микроорганизмов, восстанавливающих сульфаты, в верхних, аэробных, слоях донных отложений невелика. В нижележащих зонах, где условия приближаются к анаэробным, их количество может увеличиваться. Однако при увеличении глубины отложений, обедненных сульфатами и метаном, их численность снова может уменьшаться. Эта гипотеза согласовывалась с отсутствием данной группы прокариот в более глубоких бескислородных отложениях [30].

Количество анаэробных бактерий в настоящем исследовании не определялось. Однако мы считаем, что их возможное присутствие в донных осадках не оказало значительного влияния на результаты

определения количества культивируемых бактерий. Несмотря на то что дно водоемов считается распространенной средой для развития анаэробов, строго анаэробные условия в донных отложениях в основном отмечаются либо на больших глубинах, либо в экстремальных специфических условиях. Помимо этого, несмотря на существование локальных зон с анаэробными условиями, о которых говорилось выше, в нашем случае вскрытая толща донных отложений представлена аэробной средой. Косвенно это подтверждается наличием углеводородокисляющих бактерий, так как окисление нефтяных углеводородов — процесс аэробный.

Интересный момент в результатах наших исследований — изменение морфологических особенностей бактериальных сообществ в слоях донных осадков. На обеих станциях (Зеленецкая и Ярнышная губы) отмечается снижение доли палочковых форм бактерий с глубиной. Доля кокковых форм, напротив, увеличивается. Как уже отмечалось, сообщества донных осадков морфологически не были разнообразными, в основном это мелкие палочковые и кокковые формы бактерий.

Увеличение доли кокковых форм бактерий может быть связано с особенностями среды, а именно с уменьшением доступного для бактериального окисления органического вещества. Косвенно это утверждение можно подтвердить исследованиями, проводимыми с пелагическими бактериальными сообществами. Известно, что увеличение палочковых форм в арктических широтах связано с продолжительностью светового дня, влияющего на фотосинтетическую активность водорослей [31].

По результатам исследований пресноводных водоемов было сделано предположение, что увеличение доли кокковых форм в сообществах является своего рода «морфологической» адаптацией к низким концентрациям органического вещества [32]. Эффективное использование органического вещества субстрата при его низких концентрациях достигается за счет увеличения отношения площади поверхности организма к его объему. Наиболее высокие значения данного показателя характерны для мелких кокковидных форм бактерий [32]. Подобное предположение высказывалось и при исследовании бактериопланктона Баренцева моря. В низкопродуктивных водах северной части Баренцева моря преобладают бактерии малых размеров [33]. Что касается донных отложений, то такое явление отмечалось также в осадках водохранилищ Камского каскада [34]. С уменьшением объемов клеток увеличивается их удельная поверхность, что приводит к ускорению метаболических процессов. Можно предположить, что при движении вглубь донных осадков снижается содержание доступного для бактерий органического вещества. Это приводит к «морфологической перестройке» бактериального сообщества в сторону увеличения доли мелких кокковых форм бактерий.

Заключение

Проведенные исследования показали, что осадочная толща Зеленецкой (0—26 см) и Ярнышной (0—28 см) губ представлена «молодыми» отложениями, сформировавшимися в первой половине XX — начале XXI вв. Датирование обеих колонок по $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ подтверждено профилями ^{137}Cs , первое появление которого в нижних слоях связано с максимумом атмосферных выпадений радионуклида в 1963 г. Расчеты темпов седиментации по модели CFCS подтверждают гипотезу о стабильных условиях осадконакопления в обоих исследуемых районах.

В слоях осадков, сформировавшихся в разные периоды XX—XXI вв., определены количественные характеристики микробных сообществ осадочной толщи Зеленецкой и Ярнышной губ Баренцева моря и основные факторы, влияющие на распределение общей численности культивируемых и углеводородоокисляющих форм бактерий от поверхности к глубине.

Наибольшая ОЧБ обнаружена в поверхностном слое отложений в обеих исследуемых колонках. В Зеленецкой губе, подверженной антропогенному воздействию, этот показатель был выше, чем в Ярнышной. Однако разница укладывалась в величины одного порядка.

Общая тенденция снижения ОЧБ в вертикальном профиле от поверхностных к более глубоким слоям обнаружена в обеих колонках, для культивируемых форм — только в Зеленецкой губе. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными.

Присутствие углеводородоокисляющих бактерий в нижних слоях осадочной толщи Зеленецкой губы (до 31 см), датируемых периодом до начала активного хозяйственного освоения поселка Дальние Зеленцы (до 1906 г.), позволяет предположить, что нефтяные углеводороды способны проникать на значительную глубину. Полученный результат по изменению численности углеводородоокисляющих бактерий по глубине донных отложений можно использовать в качестве основы для мониторинга нефтяного загрязнения среды даже незначительными концентрациями нефтепродуктов. Однако это требует дополнительных исследований, так как в литературе имеются сведения, что в некоторых случаях аварийные разливы нефти и нефтепродуктов не приводят к сколько-нибудь значимым изменениям в количестве бактерий.

Во всей толще «молодых» донных отложений Зеленецкой и Ярнышной губ происходят процессы бактериальной деструкции органического вещества, в том числе и гнилостными бактериями, также способными к продуцированию сероводорода.

Изменение морфологии бактериального сообщества по профилю обеих колонок, которое проявляется разным соотношением групп кокковых и палочковидных форм бактерий, может быть связано с особенностями их среды обитания — донных отложений. Мы предполагаем, что в «молодых» отложениях краевых бассейнов Восточного Мурмана при однородном

гранулометрическом составе морских осадков ключевым фактором, влияющим на вертикальное распределение микроорганизмов, является уплотнение осадка с глубиной, а не гранулометрический состав. При увеличении плотности донного осадка с глубиной количество доступного для микробного окисления органического вещества может сокращаться, что, в свою очередь, приводит к уменьшению количества гетеротрофных бактерий и изменению морфологической структуры сообщества.

Финансирование

Отбор проб, анализ и интерпретация материала, полученного в результате исследований донных отложений в Зеленецкой и Ярнышной губах, проводились в рамках государственного задания Мурманского морского биологического института РАН.

Обработка материала, полученного из донных отложений в Зеленецкой и Ярнышной губах, выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00243 «Радиационная океанология и геоэкология прибрежного шельфа Баренцева и Белого морей. Биокосные взаимодействия в системе: донные отложения — вода — макроводоросли — микроорганизмы, их роль в ремедиации морской прибрежной экосистемы при радиационном и химическом загрязнении в условиях Арктики».

Благодарность

Авторы выражают глубокую признательность ведущему научному сотруднику лаборатории планктона ММБИ РАН М. В. Митяеву за помощь в отборе проб, а также благодарят заведующего лабораторией альгологии ММБИ РАН профессора Г. М. Воскобойникова и директора ММБИ РАН М. В. Макарова за решение логистических задач по организации экспедиции в район работ.

Литература/References

1. Kallmeyer J., Kallmeyer J., Pockalny R., Adhikari R. R., Smith D. C., D'Hondt S. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, vol. 109, no. 40, pp. 16213—16216. DOI: 10.1073/pnas.1203849109.
2. Parkes R. J., Cragg B., Roussel E., Webster G., Weightman A., Sass H. A review of prokaryotic populations and processes in sub-seafloor sediments, including biosphere: geosphere interactions. *Marine Geology*, 2014, vol. 352, pp. 409—425. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.02.009.
3. Bissett A., Burke C., Cook P. L., Bowman J. P. Bacterial community shifts in organically perturbed sediments. *Environmental Microbiology*, 2007, vol. 9, no. 1, pp. 46—60. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2006.01110.x.
4. Duran R., Bonin P., Jezequel R., Dubosc K., Gassie C., Terrisse F., Abella J., Cagnon C., Milton C., Michotey V., Gilbert F., Cuny P., Cravo-Laureau C. Effect of physical sediments reworking on hydrocarbon degradation and bacterial community structure in marine coastal sedi-

- ments. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, pp. 15248—15259. DOI: 10.1007/s11356-015-4373-2.
5. Rizzo C. et al. Effects of a simulated acute oil spillage on bacterial communities from Arctic and Antarctic marine sediments. *Microorganisms*, 2019, vol. 7, no. 12, p. 632. DOI: 10.3390/microorganisms7120632.
6. Sahm K., Berninger U. G. Abundance, vertical distribution, and community structure of benthic prokaryotes from permanently cold marine sediments (Svalbard, Arctic Ocean). *Marine Ecology Progress Series*, 1998, vol. 165, pp. 71—80. DOI: 10.3354/meps165071.
7. Hoshino T., Doi H., Uramoto G. I., Wörme L., Adhikari R. R., Xiao N., Morono Y., D'Hondt S., Hinrichs K.-U., Inagaki F. Global diversity of microbial communities in marine sediment. *Proceedings of the National academy of sciences*, 2020, vol. 117, no. 44, pp. 27587—27597. DOI: 10.1073/pnas.1919139117.
8. Robbins J. A. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. *Biogeochemistry of Lead in the Environment*. Nriagu J. O. (ed.). Amsterdam, Elsevier Scientific, 1978, pp. 285—393.
9. Appleby P. G. ^{210}Pb dating by low-background gamma. *Hydrobiologia*, 1986, vol. 143, pp. 21—27. DOI: 10.1007/BF00026640.
10. Мещеряков Н. И., Усягина И. С., Ильин Г. В., Иванова Н. С. Датирование современной осадочной толщи краевых бассейнов Восточного Мурмана (Кольский полуостров) на примере губ Ярнышная и Зеленецкая // *Арктика: экология и экономика*. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 393—405. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-393-405.
- Meshcheriakov N. I., Usyagina I. S., Ilyin G. V., Ivanova N. S. Dating of the recent sedimentary strata of the marginal basins of Eastern Murman (Kola Peninsula) using the example of Yarnyshnaya and Zelenetskaya Bays. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 393—405. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-393-405. (In Russian).
11. Ильин Г. В., Моисеев Д. В., Широколов Д. В. и др. Гидрологический режим губы Зеленецкая, Восточный Мурман // *Вестн. МГТУ. Сер. Науки о Земле*. — 2016. — Т. 19, № 1-2. — С. 268—278.
- Il'in G. V., Moiseev D. V., Shirokolobov D. V., Deryabin A. A., Pavlova L. G. Long-term dynamics of hydrological conditions of the Zelenetskaya Bay, East Murman. *Vestnik MGTU. Ser. Earth Sciences*, 2016, vol. 19, no. 1-2, pp. 268—277. (In Russian).
12. Тарасов Г. А., Погодина И. А., Хасанкаев В. Б. и др. Процессы седиментации на гляциальных шельфах. — Апатиты: КНЦ РАН, 2000. — 473 с.
- Tarasov G. A., Pogodina I. A., Khasankaev V. B., Kukina N. A., Mityaev M. V. Sedimentation processes on glacial shelves. Apatity, KSC RAS, 2000, 473 p. (In Russian).
13. Митяев М. В., Герасимова М. В., Бергер В. Я. Взвесь и вертикальные потоки осадочного вещества в заливах Мурманского берега Баренцева моря и Кольского берега Белого моря // *Океанология*. — 2017. — Т. 57, № 2. — С. 339—347. — DOI: 10.7868/S0030157416060113.
- Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Berger V. J. Suspended particulate matter and vertical fluxes of sedimentary material in bays of the Murmansk (Barents Sea) and Karelian (White Sea) coasts. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 2, pp. 306—314. DOI: 10.7868/S0030157416060113.
14. Sanchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernández A. C. ^{210}Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 82, pp. 183—200. DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.024.
15. Сивинцев Ю. В., Вакуловский С. М., Васильев А. П. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. — М.: ИздАТ. — 2005. — 624 с.
- Sivintsev Yu. V., Vakulovsky S. M., Vasiliev A. P. et al. Technogenic Radionuclides in the Seas Surrounding Russia. Moscow, IzdAT, 2005, 624 p. (In Russian).
16. Андреева И. А., Лапина Н. Н. Методика гранулометрического анализа донных осадков Мирового океана и геологическая интерпретация результатов лабораторного изучения вещественного состава осадков. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. — 45 с.
- Andreeva I. A., Lapina N. N. Methods of granulometric analysis of bottom sediments of the World Ocean and geological interpretation of the results of laboratory study of the material composition of sediments. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1998, 45 p. (In Russian).
17. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. — 242 с.
- Dauvalter V. A. Bottom sediments geoecology of lakes. Murmansk, Murmansk State Technical Univ., 2012, 242 p. (In Russian).
18. Porter K. G., Feig Y. S. The use DAPI for identifying and counting of aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, 1980, vol. 25, no. 5, pp. 943—948.
19. Aaronson A. A. *Experimental Microbial Ecology*. New York; London, Academic Press, 1970, 236 p.
20. Ильинский В. В. Гетеротрофный бактериопланктон // *Практическая гидробиология: Учеб. для ун-тов*. Под ред. В. Д. Федорова и В. И. Капкова. — М.: ПИМ, 2006. — 367 с.
- Il'inskiy V. V. Heterotrophic bacterioplankton in Practical hydrobiology. Freshwater ecosystems: a textbook for students biologists. Ed. by V. D. Fedorov, V. I. Kapkov. Moscow, PIM, 2006, 367 p. (In Russian).
21. Mills A. L., Breul C., Colwell R. R. Enumeration of petroleum-degrading marine and estuarine microorganisms by the most probably number method. *Canadian J. of Microbiology*, 1978, vol. 24, no. 5, pp. 552—557. DOI: 10.1139/m78-089.
22. Meyer-Reil L. A. Bacterial growth rates and biomass production. *Microbial ecology of a brackish water environment*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1977, pp. 223—236. DOI: 10.1007/978-3-642-66791-6_16.
23. Bussmann I., Philipp B., Schink B. Factors influencing the cultivability of lake water bacteria. *J. of Microbio-*

- logical Methods, 2001, vol. 47, no. 1, pp. 41—50. DOI: 10.1016/S0167-7012(01)00289-5.
24. Stevens H., Simon M., Brinkhoff T. Cultivable bacteria from bulk water, aggregates, and surface sediments of a tidal flat ecosystem. *Ocean dynamics*, 2009, vol. 59, pp. 291—304. DOI: 10.1007/s10236-008-0168-z.
25. Ryzhik I., Pugovkin D., Makarov M., Roleda M. Y., Basso L., Voskoboynikov G. Tolerance of *Fucus vesiculosus* exposed to diesel water-accommodated fraction (WAF) and degradation of hydrocarbons by the associated bacteria. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, p. 113072. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113072.
26. Rusakov V. Y., Lukmanov R. A., Savin A. S. About fluctuations in the excess ^{210}Pb flux into the East Siberian Arctic Shelf sediments, the Laptev Sea. *J. of Environmental Radioactivity*, 2024, vol. 273, p. 107387. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107387.
27. Ravenschlag K., Sahm K., Pernthaler J., Amann R. High bacterial diversity in permanently cold marine sediments. *Applied and environmental microbiology*, 1999, vol. 65, no. 9, pp. 3982—3989. DOI: 10.1128/AEM.65.9.3982-3989.1999.
28. Karnaukhova G. A. Sedimentation rate and physical properties of bottom sediments in the Angara reservoirs under the cyclical conditions of the level regime. *LITHOSPHERE (Russia)*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 271—279. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-271-279.
29. Матишов Г. Г., Булышева Н. И., Воскобойников Г. М. и др. Научные основы мониторинга и прогнозирования опасных явлений в зоне стратегических объектов в акватории российских морей. — Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2022. — 236 с.
- Matishov G. G., Bulysheva N. I., Voskoboynikov G. M. et al. Scientific basis for monitoring and forecasting hazardous phenomena in the zone of strategic facilities in the water area of the Russian seas. *Rostov-on-Don, SSC RAS Publishers*, 2022, 236 p. (In Russian).
30. Begmatov S., Savvichev A. S., Kadnikov V. V., Belitsky A. V., Rusanov I. I., Klyuvitkin A. A., Novichkova E. A., Mardanov A. V., Pimenov N. V., Ravin N. V. Microbial communities involved in methane, sulfur, and nitrogen cycling in the sediments of the Barents Sea. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, no. 11, p. 2362. DOI: 10.3390/microorganisms9112362.
31. Байтаз В. А., Байтаз О. Н., Мишустина И. Е. Морфометрия клеток, численность и биомасса основных морфологических групп бактериопланктона Баренцева моря // *Океанология*. — 1996. — Т. 36, № 6. — С. 883—887.
- Baitaz V. A., Baitaz O. N., Mishustina I. E. Cell morphometry, abundance and biomass of the main morphological groups of bacterioplankton in the Barents Sea. *Oceanology*, 1996, vol. 36, no. 6, pp. 883—887. (In Russian).
32. Гордиенко А. П. О роли бактериопланктона в функционировании морской экосистемы // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы*. — Т. 2. — Севастополь, 2016. — С. 264—267.
- Gordienko A. P. On the role of bacterioplankton in the functioning of the marine ecosystem. *Marine biological research: achievements and prospects*. Vol. 2. Sevastopol, 2016, pp. 264—267. (In Russian).
33. Венгер М. П. Вирио- и бактериопланктон Баренцева моря в осенний период // *Тр. Кольского науч. центра РАН*. — 2021. — Т. 12, № 3 (9). — С. 45—53. — DOI: 10.37614/2307-5252.2021.3.9.006.
- Venger M. P. Virio- and bacterioplankton of the Barents Sea in the autumn period. *Transactions of the Kola Scientific Center RAS*, 2021, vol. 12, no. 3 (9), pp. 45—53. DOI: 10.37614/2307-5252.2021.3.9.006. (In Russian).
34. Шерышева Н. Г., Ракитина Т. А., Поветкина Л. П. Влияние экологического состояния водоемов на размерно-морфологическую структуру бактериобентоса (на примере водохранилищ Камского каскада) // *Карельский науч. журн.* — 2016. — Т. 5, № 3 (16). — С. 102—106.
- Sherysheva N. G., Rakitina T. A., Povetkina L. P. Influence of the ecological state of reservoirs on the size-morphological structure of bacteriobenthos (on the example of Kama reservoirs). *Karelian Scientific J.*, 2016, vol. 5, no. 3 (16), pp. 102—106. (In Russian).

Информация об авторах

Пуговкин Дмитрий Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: pugovkin2005@yandex.ru.

Усягина Ирина Сергеевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: usjagina@mmbi.info.

Иванова Наталья Сергеевна, стажер-исследователь, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: ivanova_ns@mmbi.info.

Венгер Марина Павловна, научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: venger@mmbi.info.

Мещеряков Никита Игоревич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: meshcheriakov104@mail.ru.

QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF MICROBIAL COMMUNITIES IN CURRENT MARINE BOTTOM SEDIMENTS OF EAST MURMAN

Pugovkin, D. V., Ivanova, N. S., Usyagina, I. S., Venger, M. P., Meshcheriakov, N. I.

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on June 16, 2025

For citing

Pugovkin D. V., Usyagina I. S., Ivanova N. S., Venger M. P., Mescheriakov N. I. Quantitative characteristics of microbial communities in current marine bottom sediments of East Murman. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 4, p. 605-618. (In Russian).

Abstract

The authors investigate quantitative characteristics of microbial communities in the bottom sediments of the Zelenetskaya and Yarnyshnaya bays of the Barents Sea formed in the first half of the 20th century. In the surface sediments of the Zelenetskaya bay, exposed to anthropogenic influences, the number of bacteria is higher than in the Yarnyshnaya bay. In the columns collected from both bays, a general trend towards a decrease in the number of microorganisms in the vertical profile is observed. Changes in the morphological structure of the bacterial community in the bottom sediments, manifested by a different ratio of coccoid and rod-shaped bacterial groups, may be due to the particularities of their habitat. The presence of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the lower layers of the sediments in Zelenetskaya Bay (up to 31 cm), dating back to the period before the start of active economic development of the settlement of Dalnie Zelentsy (< 1906) suggests that petroleum hydrocarbons are able to penetrate to a significant depth of the bottom sediment.

Key words: radionuclides, bottom sediments, Kola Peninsula, coastal zone, microbial communities.

Acknowledgements

The authors express their deep gratitude to the Leading Researcher of the Plankton Laboratory of the MMBI RAS M. V. Mityaev for assistance in sampling, and useful advices, and also thank the Head of the Laboratory of Algology, G. M. Voskoboinikov and Director of the MMBI RAS M. V. Makarov for solving the logistical problems in organizing an expedition to the study area.

Funding

Sampling, analysis and interpretation of the material obtained during bottom sediment studies in Zelenetskaya Bay were carried out within the framework of the State assignment of the MMBI RAS. Sampling in the coastal expedition, processing, analysis and interpretation of the material obtained during studies of bottom sediments in Yarnyshnaya bay were supported by the grant from the Russian Science Foundation (No. 22-17-00243-P) "Radiation oceanology and geocology of the coastal shelf of the Barents and White Seas. Bioinert interactions in the system: bottom sediments — water — macroalgae — microorganisms, their role in the remediation of the marine coastal ecosystem under radiation and chemical pollution in the Arctic".

Information about the authors

Pugovkin, Dmitriy Vitalievich, PhD of Biology, Senior Researcher, Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: pugovkin2005@yandex.ru.

Usyagina, Irina Sergeevna, PhD of Geography, Leading Researcher, Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: usyagina@mmbi.info.

Ivanova, Natalia Sergeevna, Research Intern, Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: ivanova_ns@mmbi.info.

Venger, Marina Pavlovna, Researcher, Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: venger@mmbi.info.

Meshcheriakov, Nikita Igorevich, PhD of Geography, Senior Researcher, Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: meshcheriakov104@mail.ru.