

Composition of microbial communities as an indicator of the condition of water reservoirs artificially separated from the sea basins (based on the example of the Kislogubskaya tidal power plant bay, Barents sea)



Savvichev A.S.^{1*}, Demidenko N.A.³, Kadnikov V.V.², Belenkova V.V.¹

¹ Winogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

² K.G. Skryabin Institute of Bioengineering, Federal Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

³ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

ABSTRACT. The Kislaya Bay currently refers to the water reservoirs formed as a result of the construction of the dam of the tidal power station (TPP) in the Russian Federation (1968). As a result of the reduction in the influence of tidal currents mixing the water column of the bay, the hydrological regime of the reservoir has changed. The reduction in water exchange led to the appearance of bottom stagnant waters deprived of oxygen, as well as hydrogen sulfide contamination. In the 90-s of the twentieth century, the operation of the Kislogubskaya TPP ceased and the flow regime was partially restored. In the winter season of 2024, we conducted microbiological and biogeochemical studies of the Kislaya Bay. It was shown that there was no hydrogen sulfide in the bottom water of the bay, and the processes of sulfate reduction, methane formation and methane oxidation were extremely low. At the same time, in the subsurface layer of sediment, bacteria and archaea were found that dominate the microbial communities of anoxic waters of meromictic reservoirs. We believe that with a stable exchange of water through the TPP dam, the composition of the microbial community of water and sediment will be restored. In case of negative developments, it is possible to predict the transformation of the bay into a reservoir with a community of microorganisms similar to meromictic reservoirs.

Keywords: microbial communities, microbial processes, Kislogubskaya TPP, meromictic water reservoirs, stratification, hydrogen sulfide contamination

For citation: Savvichev A.S., Demidenko N.A., Kadnikov V.V., Belenkova V.V. Composition of microbial communities as an indicator of the condition of water reservoirs artificially separated from the sea basins (based on the example of the Kislogubskaya tidal power plant bay, Barents sea) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 1079-1086. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-1079

1. Introduction

Hydrological, hydrochemical, hydrobiological and ecological studies in isolated marine basins are becoming relevant due to the increasing influence of human economic activities on coastal ecosystems. Construction of protective dams, overpasses and embankments for laying roads, creation of basins for tidal power plants (TPP), etc. – leads to the cutting off of sea bays and is accompanied by a decrease in their natural water exchange with the sea. The Kislogubskaya TPP basin is a small bay with a narrow neck and an

underwater threshold, 3.5 km long. In the middle and top of the bay there are two depressions with a depth of 36 and 30 m. A river flows into the top of the bay. Before the construction of the TPP (1965–1968), water exchange with the sea was free. In 1968, the first and so far the only TPP in Russia was put into operation. During the construction and operation of the TPP, the flowing tidal regime of the TPP was significantly disrupted. This led to the appearance of bottom stagnant waters deprived of oxygen, as well as hydrogen sulfide contamination. In the 90-s of the twentieth century, the operation of the Kislogubskaya TPP ceased and the flow

*Corresponding author.

E-mail address: savvichev@mail.ru

Received: May 30, 2024; Accepted: June 21, 2024;

Available online: August 30, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



regime was partially restored.

The composition of microbial communities in the water column and bottom sediments of both fresh and marine water bodies depends on the hydrological regime of these water bodies. Mixing of the water column due to tidal processes leads to an influx of oxygen-containing waters and, as a consequence, the formation of an oxygen-dependent microbial community. On the contrary, a reduction in water exchange leads to the depletion of oxygen and the appearance of anoxic zones, in which the composition of microbial communities changes significantly. It is known that the microbial community of anoxic waters is fundamentally different from the microbial community of the oxygenated water column (Pjevac et al., 2015; Tassi et al., 2018; Savvichev et al., 2023).

The purpose of this study was to obtain data on the hydrochemical state, the composition of microbial communities of bottom water and the surface layer of sediments, the rates of microbial processes of carbon and sulfur cycles in Kislogubsky Bay and to compare the composition of microbial communities with the communities of the open part of the bay. The practical significance of studying of microbial communities and microbial processes in such water bodies is associated, first of all, with the need to predict the negative consequences of hydrogen sulfide contamination in artificially enclosed marine areas that appeared as a result of human intervention, as well as with the need to predict the response of marine ecosystems to the emergence of a near-bottom anoxic zone (Velinsky and Fogel, 1999; Savvichev et al., 2017; Middelburg and Levin, 2009).

2. Materials and methods

Sampling of bottom water and sediments was carried out in early April 2024. Temperature, salinity, oxygen, hydrogen sulfide, and methane content were measured. The total number of microorganisms was counted. The rates of microbial processes: dark car-

bon dioxide assimilation (DCA), sulfate reduction (SR), autotrophic (hydrogenotrophic) methane formation (Mgh) and methane oxidation (MO) was determined by the radioisotope method using labeled compounds - $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$, $^{14}\text{CH}_4$ and $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ (Pimenov and Bonch-Osmolovskaya, 2006; Savvichev et al., 2021). Isolation of DNA, PCR amplification, and high-throughput sequencing of 16S rRNA gene fragments were carried out according to (Kadnikov et al., 2019).

3. Results and discussion

Sediments 2 and 3 (0–2 cm) were sampled from deep depressions of the Kislogubsky Bay, consisted of pelite and silt, had a gray-brown color, and were weakly oxidized ($E_h = 40\text{--}80$ mV). Sediment 4 (2–7 cm) had inclusions of hydrotroilite, was weakly reduced ($E_h = -20\text{--}+40$ mV), and did not smell of hydrogen sulfide. Sediment 1 was sampled as a “control” in the open sea part of the bay and consisted of silt and sand and was oxidized. Hydrogen sulfide sediment 5 (1.95 mmol L^{-1} ; also “control”) was sampled in Kanda Bay.

Low rates of microbial processes were noted in the sediment of the “marine” station (DCA; 50–110 $\text{nmol L}^{-1} \text{day}^{-1}$). In the sediments of Kislogubsky Bay, DCA rate was noticeably higher (up to 910 $\text{nmol L}^{-1} \text{day}^{-1}$), but lower than in the restored sediment of Kanda Bay (up to 34 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{day}^{-1}$). The rate of hydrogenotrophic methanogenesis was shown only in “control” sediment 6. The rate of MO was extremely low in sediment 1 and high in sediment 6. In sediments 2, 3 and 4, the MO rate varied from 80 to 320 $\text{nmol CH}_4 \text{dm}^{-3} \text{day}^{-1}$. SR rate was minimal in sediment 1, increased in sediments of Kislogubsky Bay (up to 1.2 $\mu\text{mol S}^2\text{dm}^{-3} \text{day}^{-1}$) and expectedly high in sediment 6 (up to 30 $\mu\text{mol S dm}^{-3} \text{day}^{-1}$) of Kanda Bay.

Figure presents the correlation data for the 10 most representative taxonomic groups that make up the microbial communities of the analyzed marine sediments. Microbial communities of the surface layer

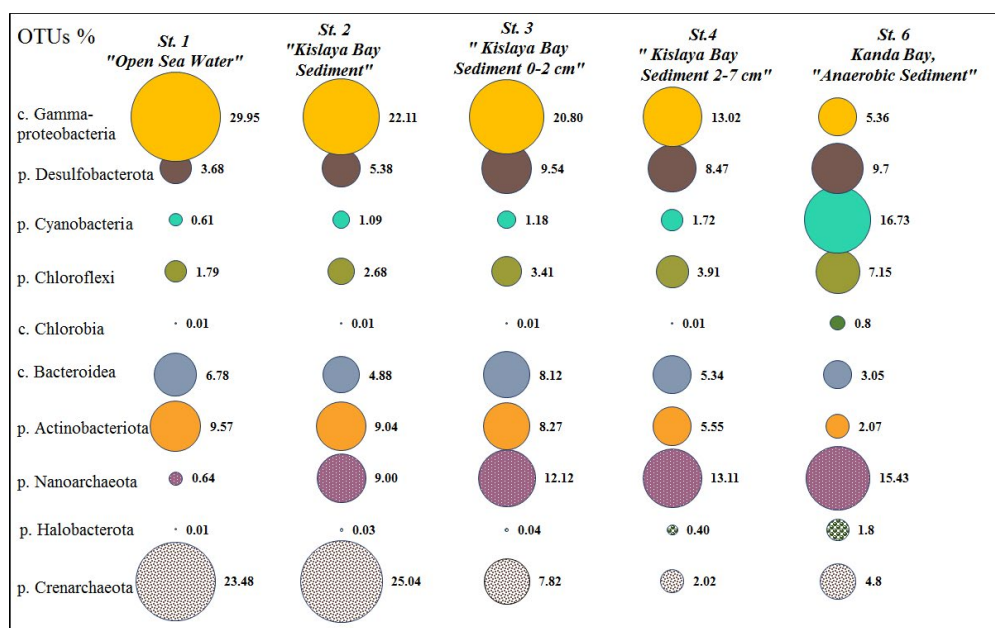


Fig. The contents of the main taxonomic groups of archaea and bacteria in the microbial community in sediment samples from Kislogubsky Bay and “comparison water reservoirs”.

of sediments differed significantly from each other. In the “control” sediment, the archaeal community was clearly dominated by uncultivated archaea of the genus *Nitrosopumilus* (phylum Crenarchaeota). Archaea of the genus *Nitrosopumilus* are obligate aerobes capable of ammonium oxidation. In the remaining sediments, *Nitrosopumilus* archaea were represented in minimal proportions. The presence of *Nitrosopumilus* in samples from Kislogubsky Bay indicates proximity to the open sea.

Bacteria of the Bacteroidia class were found in close proportions in all samples. Bacteria of this class are widespread in a wide variety of habitats, from marine and fresh waters and soil to the gastrointestinal tract of animals. Bacteria of the genus *Chloroflexi* were found in microbial communities of oxygen-deficient sediments. A significant part of *Chloroflexi* was represented by heterotrophic unculturable bacteria from the class Anaerolineae, genus SBR1031. These bacteria are anaerobic syntrophs mutualistically associated with methanogenic archaea. Cyanobacteria live in the photic zone of water bodies; the bottom layer (if light does not reach it) is exclusively a place of accumulation, but not habitat, of cyanobacteria. The abundance of cyanobacteria is an indicator of the productivity of the photic zone. In terms of the abundance of cyanobacteria, Kislogubskaya Bay was ahead of the open bay, but clearly inferior to Kanda Bay. Sulfate-reducing bacteria of the phylum Desulfobacterota were found in all sediment samples. Most representatives of the phylum Desulfobacterota belonged to the classes Desulfobacteria and Desulfobulbia. The abundance of bacteria of the Gammaproteobacteria class in the studied samples turned out to be a striking feature that distinguishes the sediment sample from the open part of the bay from other samples. Bacteria close to classical methanotrophs from the genera *Methylocystis* and *Methylocapsa* were found in sediment samples.

The studies have shown that the sediments of the Kislogubsky Bay are similar to the sediments of the open part of the bay. At the same time, signs of restoration conditions acquired during the construction of the TPP remain. This is oxygen deficiency and the presence of hydrogen sulfide. In the bottom water of the bay, the rate of microbial processes is noticeably increased: carbon dioxide assimilation, sulfate reduction, methanogenesis and methane oxidation, which indicates the acquisition of new qualities inherent in stratified water reservoirs. Reservoirs of this type are known on the White Sea coast (Krasnova et al., 2015). They are unique in origin, because formed by separation from the sea due to the rapid uplift of land. As one moves away from the sea, the leaching regime weakens, which leads to the activation of anaerobic microbial processes, primarily the process of sulfate reduction (Losyuk et al., 2015). Sulfate-reducing bacteria do not limit the list of anaerobic microorganisms involved in the transformation of organic compounds. Under anaerobic conditions, methane formation is provided by methanogenic archaea, which participate, along with sulfate-reducing bacteria, in the terminal phase of decomposition of organic matter.

4. Conclusions

The studies carried out showed that the restoration of the flow regime had a beneficial effect on the state of the water column and bottom sediments. Hydrogen sulfide disappeared from the bottom water (at least in the winter season), the intensity of anaerobic microbial processes weakened, and the composition of the microbial community turned out to be closer to the open part of the bay than to the meromictic reservoir. We believe that with a stable exchange of water through the PES dam, the composition of the microbial community of water and sediment will be completely restored.

5. Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant 23-24-00208).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Kadnikov V.V., Savvichev A.S., Mardanov A.V. et al. 2019. Microbial communities involved in the methane cycle in the near-bottom water layer and sediments of the meromictic subarctic Lake Svetloe. Antonie van Leeuwenhoek. DOI: [10.1007/s10482-019-01308-1](https://doi.org/10.1007/s10482-019-01308-1)
- Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milyutina I.A. et al. 2015. Study of microbial communities in redox zone of meromictic lakes isolated from the White Sea using spectral and molecular methods. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom: 1–12. DOI: [10.1017/S0025315415000582](https://doi.org/10.1017/S0025315415000582)
- Losyuk G., Kokryatskaya N., Krasnova E. 2015. Formation of hydrogen sulfide in isolated basins at the Karelian of the White Sea coast. EARSel eProc 14: 49–54.
- Middelburg J.J., Levin L.A. 2009. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences 6 (7): 1273–1293. DOI: [10.5194/bg-6-1273-2009](https://doi.org/10.5194/bg-6-1273-2009)
- Pimenov N.V., Bonch-Osmolovskaya E.A. 2006. In situ activity studies in thermal environments. In: Rainey FA, Oren A. (Eds.), Extremophiles. Methods in Microbiology. Vol. 35. Elsevier Ltd. pp. 29–53.
- Pjevac P., Korlevic´ M., Berg J.S. et al. 2015. Community shift from phototrophic to chemotrophic sulfide oxidation following anoxic holomixis in a stratified seawater lake. Applied Environmental Microbiology 81: 298–308. DOI: [10.1128/AEM.02435-14](https://doi.org/10.1128/AEM.02435-14)
- Savvichev A.S., Demidenko N.A., Krasnova E.D. et al. 2017. Microbial processes in the Kanda bay, a meromictic water body artificially separated from the White Sea. Doklady Biological Sciences 474 (1): 135–139.
- Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Rusanov I.I. et al. 2021. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles and the relevant microorganisms in the water column of the meromictic lake Bol’shie Khruslomeny Lake at the White Sea coast. Frontiers in Microbiology 11: 1–17. DOI: [10.3389/fmicb.2020.01945](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01945)
- Savvichev A.S., Demidenko N.A., Kadnikov V.V. et al. 2023. Microbial community composition as an indicator of the state of basins located at the sea coast (exemplified by the Kanda bay, Kandalaksha gulf, White Sea). Microbiology 92 (6): 819–830.

Tassi F., Fazi S., Rossetti S. et al. 2018. The biogeochemical vertical structure renders a meromictic volcanic lake a trap for geogenic CO₂ (Lake Averno, Italy) // PLoS ONE 13(3): e0193914. DOI: [10.1371/journal.pone.0193914](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193914)

Velinsky D.J., Fogel M.L. 1999. Cycling of dissolved and particulate nitrogen and carbon in the Framvaren Fjord, Norway: Stable isotopic variations. *Marine Chemistry* 67 (3-4): 161-180.

Состав микробных сообществ как индикатор состояния водоемов, искусственно отделенных от морского бассейна (на примере залива Кислогубской приливной электростанции, Баренцево море)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСаввичев А.С.^{1*}, Демиденко Н.А.³, Кадников В.В.², Беленкова В.В.¹¹ Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, 117312 Россия² Институт биоинженерии им. К.Г. Скрябина, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, 117312 Россия³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия

АННОТАЦИЯ. Залив (губа) Кислая в настоящее время относится к водоемам, образовавшимся в результате строительства плотины единственной в Российской Федерации приливной электростанции (1968 г). В результате сокращения влияния приливо-отливных течений, перемешивающих водную толщу залива, изменился гидрологический режим водоема. Сокращение водообмена привело к появлению придонных застойных вод, лишенных кислорода, а также сероводородного заражения. В 90-х годах XX века эксплуатация Кислогубской ПЭС прекратилась и проточный режим частично восстановился. В зимний сезон 2024 г нами проведены микробиологические и биогеохимические исследования водоема. Показано, что в придонной воде залива сероводород отсутствовал, процессы сульфатредукции, метанобразования и метаноокисления были крайне низки. Вместе с тем в подповерхностном слое осадка найдены бактерии и археи, доминирующие в микробных сообществах аноксигенных вод меромиктических водоемов. Мы полагаем, что при устойчивом обмене вод через плотину ПЭС состав микробного сообщества вод и осадков восстановится. При негативном развитии событий можно дать прогноз превращения залива в водоем с сообществом микроорганизмов, сходным с меромиктическими водоемами.

Ключевые слова: микробные сообщества, микробные процессы, Кислогубская ПЭС, меромиктические водоемы, стратификация, сероводородное заражение

Для цитирования: Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Кадников В.В., Беленкова В.В. Состав микробных сообществ как индикатор состояния водоемов, искусственно отделенных от морского бассейна (на примере залива Кислогубской приливной электростанции, Баренцево море) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 1079-1086. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-1079

1. Введение

Гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и экологические исследования в морских изолированных бассейнах становятся актуальными в связи с возрастающим влиянием хозяйственной деятельности человека на прибрежные экосистемы. Сооружение защитных дамб и плотин, эстакад и насыпей для прокладки дорог, создание бассейнов приливных электростанций (ПЭС) и т.п. – приводит к отсечению морских заливов и сопровождается уменьшением их естественного водообмена с морем. Бассейн Кислогубской ПЭС – это небольшой залив с узким горлом и подводным порогом, длиной 3.5 км. В середине и вершине губы

– две впадины с глубиной 36 и 30 м. В вершину губы впадает речка. До сооружения ПЭС (1965–1968 гг.) водообмен с морем был свободный. В 1968 г. была сдана в эксплуатацию первая и пока единственная в России ПЭС. Во время строительства и эксплуатации ПЭС проточный приливо-отливной режим ПЭС был существенно нарушен. Это привело к появлению придонных застойных вод, лишенных кислорода, а также сероводородного заражения. В 90-х годах XX века эксплуатация Кислогубской ПЭС прекратилась и проточный режим частично восстановился.

Состав микробных сообществ водной толщи и донных осадков как пресных, так и морских водоемов зависит от гидрологического режима этих водоемов. Перемешивание водной толщи за счет

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: savvichev@mail.ru

Поступила: 30 мая 2024; Принята: 21 июня 2024;

Опубликована online: 30 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



приливо-отливных процессов приводит к притоку кислородсодержащих вод и, как следствие, формированию кислородзависимого микробного сообщества. Напротив, сокращение водообмена приводит к истощению кислорода и появлению аноксических зон, в которых значительно меняется состав микробных сообществ. Известно, что микробное сообщество аноксических вод коренным образом отличается от микробного сообщества кислородсодержащей водной толщи (Pjevac et al., 2015; Tassi et al., 2018; Savvichev et al., 2023).

Целью настоящего исследования было получение данных о гидрохимическом состоянии, составе микробных сообществ придонной воды и поверхностного слоя донных осадков, интенсивности микробных процессов циклов углерода и серы в Кислогубском заливе и сравнению состава сообществ с микробными сообществами открытой части залива. Практическая значимость исследования микробных сообществ и микробных процессов в таких водоемах связана, прежде всего, с необходимостью прогноза негативных последствий сероводородного заражения в искусственно замкнутых морских акваториях, появившихся в результате вмешательства человека, а также с необходимостью прогноза реакции морских экосистем на появление придонной аноксической зоны (Velinsky and Fogel, 1999; Savvichev et al., 2017; Zhang et al., 2010; Middelburg and Levin, 2009).

2. Материалы и методы

Отбор проб придонной воды и донных осадков проводили в начале апреля 2024 г. Измеряли температуру, соленость, содержание кислорода, сероводорода, метана. Проводили учет общей численности микроорганизмов (ОЧМ). Интенсивности микробных процессов: темновой ассимиляции углекислоты (DCA), сульфатредукции (SR), автотрофного (гидрогенотрофного) образования метана

(MGh) и окисления метана (MO) определяли радиоизотопным методом с использованием меченых соединений – $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$, $^{14}\text{CH}_4$ и $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ (Pimenov and Bonch-Osmolovskaya, 2006; Savvichev et al., 2021). Выделение метагеномной ДНК, ПЦР-амплификация и высокопроизводительное секвенирование фрагментов генов 16S рРНК проводили согласно (Kadnikov et al., 2019)

3. Результаты и обсуждение

Осадки 2 и 3 (0–2 см) были отобраны из глубоких понижений Кислогубского залива, состояли из пелита и алеврита, имели серо-коричневый цвет, были слабо окисленными ($E_h = 40\text{--}80\text{ mV}$). Осадок 4 (2–7 см) имел вкрапления гидротроилита, был слабо восстановленным ($E_h = -20\text{--}+40\text{ mV}$), запаха сероводорода не имел. Осадок 1 был отобран как «контрольный» в открытой части залива, состоял из алеврита и песка и был окисленным. Сероводородный осадок 5 (1.95 ммоль л^{-1} ; также «контрольный») был отобран в заливе Канда.

Интенсивность микробных процессов в поверхностных осадках Кислогубского залива. Низкая микробная активность ТАУ была отмечена в осадке «морской» станции (50–110 нмоль $\text{л}^{-1}\text{ сут}^{-1}$). В осадках Кислогубского залива активность ТАУ была заметно выше (до 910 нмоль $\text{л}^{-1}\text{ сут}^{-1}$), но ниже, чем в восстановленном осадке залива Канда (до 34 мкмоль $\text{л}^{-1}\text{ сут}^{-1}$). Активность (гидрогенотрофного) метаногенеза была показана только в «контрольном» осадке 6. Интенсивность MO была крайне низкой в осадке 1 и высокой в осадке 6. В осадках 2, 3 и 4 величина MO варьировала от 80 до 320 нмоль $\text{CH}_4\text{ дм}^{-3}\text{ сут}^{-1}$. Активность SR была минимальной в осадке 1, повышенной в осадках Кислогубского залива (до 1.2 мкмоль $\text{S}^{2-}\text{ дм}^{-3}\text{ сут}^{-1}$) и ожидаемо высокой в осадке 6 (до 30 мкмоль $\text{S дм}^{-3}\text{ сут}^{-1}$) залива Канда.

На рисунке представлены данные соотношения 10 наиболее представительных таксономиче-

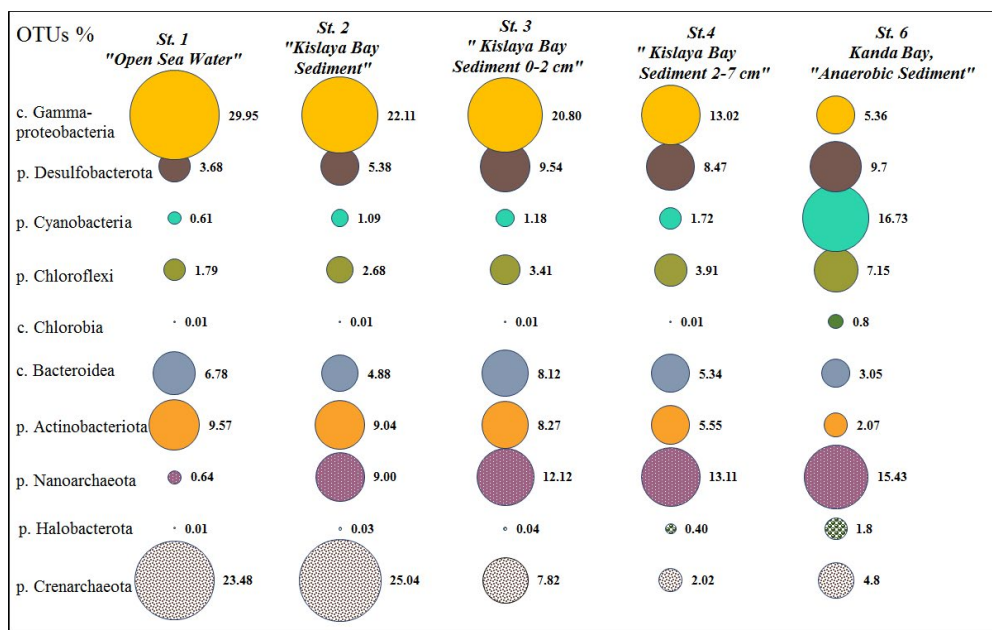


Рис. Доля основных таксономических групп архей и бактерий в составе микробного сообщества в образцах осадков Кислогубского залива и «водоемах сравнения».

ских групп, составляющих микробные сообщества проанализированных морских осадков. Микробные сообщества поверхностного слоя осадков значительно отличались друг от друга. В «контрольном» осадке в сообществе архей явно доминировали некультивируемые археи рода *Nitrosopumilus*, (филум Crenarchaeota). Археи рода *Nitrosopumilus* – облигатные аэробы, способные к окислению аммония. В остальных осадках археи *Nitrosopumilus* были представлены в минимальных долях. Присутствие *Nitrosopumilus* в образцах Кислогубского залива указывает на близость к открытой части моря.

Бактерии класса *Bacteroidia* во всех образцах найдены в близких долях. Бактерии этого класса широко распространены в самых разных местах обитания, от морских и пресных вод и почвы до желудочно-кишечного тракта животных. Бактерии рода *Chloroflexi* найдены в составе микробных сообществ осадков с дефицитом кислорода. Значительная часть *Chloroflexi* была представлена гетеротрофными некультивируемыми бактериями из класса *Anaerolineae*, род SBR1031. Эти бактерии являются анаэробными синтрофами, мутуалистически связанными с метаногенными археями. Цианобактерии обитают в фотической зоне водоемов, придонный слой (если до него не доходит свет) является исключительно местом накопления, но не обитания цианобактерий. Обилие цианобактерий является показателем продуктивности фотической зоны. По обилию цианобактерий Кислогубская губа опережала открытый залив, но явно уступала заливу Канда. Сульфатредуцирующие бактерии филума *Desulfobacterota* найдены во всех образцах осадков. Большинство представителей филума *Desulfobacterota* относились к классам *Desulfobacteria* и *Desulfobulbia*. Обилие бактерий класса *Gammaproteobacteria* в исследуемых образцах оказалось ярким признаком, отличающим образец осадка открытой части залива от остальных образцов. В образцах осадков найдены бактерии близкие к классическим метанотрофам из родов *Methylocystis* и *Methylocapsa*.

Проведенные исследования показали, что осадки Кислогубского залива похожи на осадки открытой части залива. При этом сохраняются признаки восстановительных условий, приобретенных в период строительства ПЭС. Это дефицит кислорода и наличие сероводорода. В придонной воде залива заметно повышена интенсивности микробных процессов: ассимиляции углекислоты, сульфатредукции, метаногенеза и метаноокисления, что указывает на приобретение новых качеств, присущих стратифицированным водоемам. Водоемы такого типа известны на побережье Белого моря (Krasnova et al., 2015). Они уникальны по происхождению, т.к. образуются путем отделения от моря из-за быстрого поднятия суши. По мере отдаления от моря происходит ослабление промывного режима, что ведет к активизации анаэробных микробных процессов, в первую очередь процесса сульфатредукции (Losyuk et al., 2015). Сульфатредуцирующие бактерии не ограничивают перечень анаэробных микроорганиз-

мов, участвующих в трансформации органических соединений. В анаэробных условиях образование метана обеспечивают метаногенные археи, участвующие, наряду с сульфатредуцирующими бактериями, в терминальной фазе разложения органического вещества.

4. Выводы

Проведенные исследования показали, что восстановление проточного режима благоприятно отразилось на состоянии водной толщи и донных осадков. Из придонной воды исчез сероводород (по крайней мере, в зимний сезон), ослабла интенсивность анаэробных микробных процессов, состав микробного сообщества оказался более близким к открытой части залива, чем к меромиктическому водоему. Мы полагаем, что при устойчивом обмене вод через плотину ПЭС состав микробного сообщества вод и осадков полностью восстановится.

5. Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-24-00208).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Kadnikov V.V., Savvichev A.S., Mardanov A.V. et al. 2019. Microbial communities involved in the methane cycle in the near-bottom water layer and sediments of the meromictic subarctic Lake Svetloe. Antonie van Leeuwenhoek. DOI: [10.1007/s10482-019-01308-1](https://doi.org/10.1007/s10482-019-01308-1)
- Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milyutina I.A. et al. 2015. Study of microbial communities in redox zone of meromictic lakes isolated from the White Sea using spectral and molecular methods. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom: 1–12. DOI: [10.1017/S0025315415000582](https://doi.org/10.1017/S0025315415000582)
- Losyuk G., Kokryatskaya N., Krasnova E. 2015. Formation of hydrogen sulfide in isolated basins at the Karelian of the White Sea coast. EARSeL eProc 14: 49–54.
- Middelburg J.J., Levin L.A. 2009. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences 6 (7): 1273–1293. DOI: [10.5194/bg-6-1273-2009](https://doi.org/10.5194/bg-6-1273-2009)
- Pimenov N.V., Bonch-Osmolovskaya E.A. 2006. In situ activity studies in thermal environments. In: Rainey FA, Oren A. (Eds.), Extremophiles. Methods in Microbiology. Vol. 35. Elsevier Ltd. pp. 29–53.
- Pjevac P., Korlevic´ M., Berg J.S. et al. 2015. Community shift from phototrophic to chemotrophic sulfide oxidation following anoxic holomixis in a stratified seawater lake. Applied Environmental Microbiology 81: 298–308. DOI: [10.1128/AEM.02435-14](https://doi.org/10.1128/AEM.02435-14)
- Savvichev A.S., Demidenko N.A., Krasnova E.D. et al. 2017. Microbial processes in the Kanda bay, a meromictic water body artificially separated from the White Sea. Doklady Biological Sciences 474 (1): 135–139.
- Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Rusanov I.I. et al. 2021. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles and the relevant microorganisms in the water column of the

meromictic lake Bol'shie Khruslomeny Lake at the White Sea coast. *Frontiers in Microbiology* 11: 1–17. DOI: [10.3389/fmicb.2020.01945](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01945)

Savvichev A.S., Demidenko N.A., Kadnikov V.V. et al. 2023. Microbial community composition as an indicator of the state of basins located at the sea coast (exemplified by the Kanda bay, Kandalaksha gulf, White Sea). *Microbiology* 92 (6): 819–830.

Tassi F., Fazi S., Rossetti S. et al. 2018. The biogeochemical vertical structure renders a meromictic volcanic lake a trap for geogenic CO₂ (Lake Averno, Italy) // *PLoS ONE* 13(3): e0193914. DOI: [10.1371/journal.pone.0193914](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193914)

Velinsky D.J., Fogel M.L. 1999. Cycling of dissolved and particulate nitrogen and carbon in the Framvaren Fjord, Norway: Stable isotopic variations. *Marine Chemistry* 67 (3-4): 161-180.

Zhang J.D., Gilbert D., Gooday A. et al. 2010. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences, European Geosciences Union (EGU)* 7: 1443-1467.