

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-81-86



ДОННЫЕ ОСАДКИ В МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМАХ ГУБЫ КАНДА БЕЛОГО МОРЯ И ГУБЫ КИСЛАЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ИЗОЛЯЦИИ

✉ Демиденко Н.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

✉ demidenko_nikola@mail.ru

В результате гидрологических, микробиологических и седиментологических исследований, проведенных в водоемах губы Канда, искусственно отделенных от Кандалакшского залива железнодорожной фильтрующей дамбой, и в бассейне Кислогубской ПЭС, изучен процесс развития сероводородного заражения при их отделении от прилегающих акваторий моря. Рассмотрены гидрологические условия в меромиктических водоемах губы Канда на разной стадии изоляции от Кандалакшского залива. Изучены микробный состав и процессы, протекающие в водоемах губы Канда и в бассейне производственно-опытной Кислогубской ПЭС. Отобраны колонки донных отложений и проведен геохимический анализ верхних слоев осадка с дискретностью 1 см. Оценена скорость осадконакопления после отделения водоемов губы Канда от моря. Результаты исследований используются в прогнозе экологических последствий сооружения защитных дамб и при проектировании Северной ПЭС в губе Долгой Баренцева моря.

Ключевые слова: *губа Канда, Кислогубская ПЭС, меромиктические водоемы, сероводородное заражение, донные осадки*

Целью настоящего исследования было получение количественных гидрологических и гидрохимических характеристик, интенсивности микробных процессов и изучение условий осадконакопления в водной толще и верхнем слое донных осадков в водоемах губы Канда Кандалакшского залива и бассейне Кислогубской приливной электростанции. Эти исследования в морских изолированных бассейнах становятся все более актуальными в связи с возрастающим влиянием хозяйственной деятельности человека, в первую очередь на прибрежные экосистемы. Морское гидротехническое строительство – сооружение защитных дамб и плотин, эстакад и насыпей для прокладки дорог, создание рабочих бассейнов приливных электростанций и т.п. – связано во многих случаях с необходимостью отсечения морских заливов, эстуариев, полузакрытых участков прибрежных акваторий и сопровождается уменьшением их естественного водообмена с морем. К искусственно изолированным морским акваториям относятся бассейны приливных электростанций, заливы и эстуарии, защищаемые дамбами от наводнений, отсекаемые железнодорожными и автомобильными насыпями, рыбоводные садки и т.д.

В меромиктических водоемах с повышенной стратификацией, водообмен которых с открытым морем затруднен мелководным порогом или иной преградой, в результате деятельности бактерий–сульфатредукторов в донном осадке и в воде котловины может накапливаться сероводород. Меромиктические водоёмы характеризуются наличием анаэробной зоны в монимолимнионе. Осадок заражен обычно сильнее, чем вода, имеет на поверхности черный налет. Черный цвет по всей его толще указывает на постоянство заражения. Примером крайнего проявления такой изоляции водоема может служить оз. Могильное на о.Кильдин в Баренцевом море, которое отделено от моря естественной фильтрующей перемычкой [Реликтовое ..., 1975].

В естественных морских водоемах с узким горлом и мелководным порогом, приводящим к понижению водообмена с морем, отмечается наличие сероводорода в придонном горизонте, но сохраняется в целом морской облик флоры и фауны. К таким водоемам можно отнести исследованные меромиктические озера–«изгои» в окрестностях Беломорской биостанции МГУ имени Н.А. Перцова [Краснова и др., 2020].

Искусственно отсеченные водоемы с полностью или частично уменьшенным водообменом образовались на о. Большом Соловецком, оз. Большие Хрусломины и оз. Банное на побережье Кандалакшского залива на о. Олений в губе Ковда, отделенные от моря искусственной дамбой в 1897 г. для целей опреснения и использования паровыми машинами лесозавода, губы Канда в вершине Кандалакшского залива Белого моря с 1916 г. после строительства железнодорожной дамбы и с середины 60-х годов XX в. после строительства автомобильной трассы (рис. 1 а), в губе Кислой Баренцева моря (Западный Мурман) после строительства в 1965–1968 гг. Кислогубской приливной электростанции (рис. 1 б).

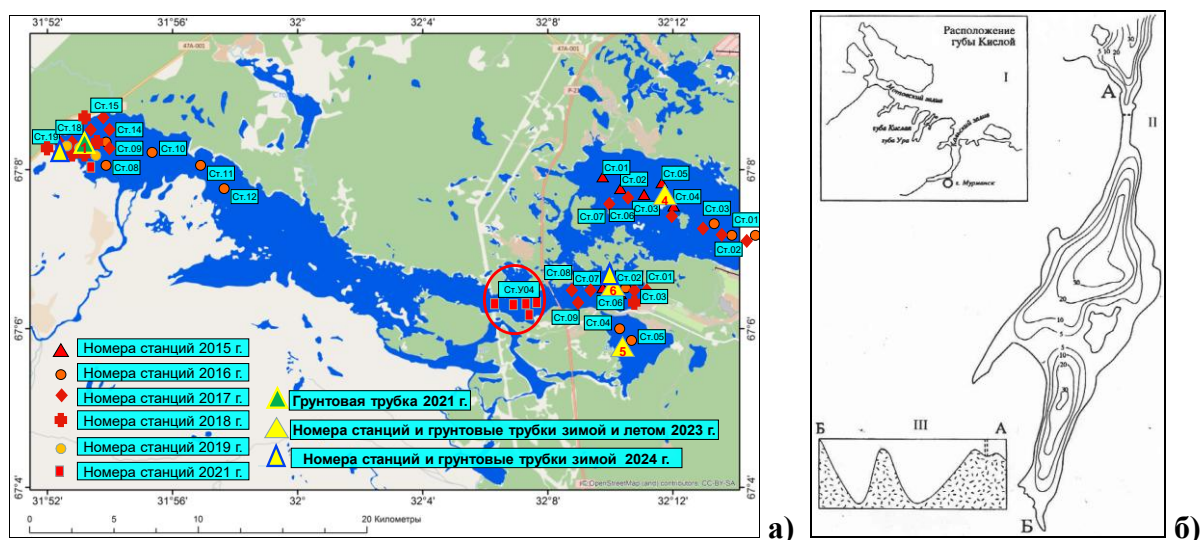


Рис. 1а,б. Схема губы Канда с номерами гидролого-биологических станций 2015–2024 гг. (1а). Местоположение Кислогубской ПЭС в Баренцевом море (I), карта глубин в изобатах (II), профиль губы Кислой (III), горло и кутовая часть губы (А, Б), пунктир – створ плотины (1б).

Методика исследований. Колонки донных осадков в губе Канде отбирались с помощью гравитационной грунтовой трубки Неймисто в августе 2021 и 2023 г. (рис. 1а). В кутовой части губы Канда отобрали колонку длиной 42 см (26 горизонтов). В бывшем меромиктическом, в настоящее время пресноводном, озере Федосеевском вскрыта самая глубокая колонка: до 60 см (34 горизонта). Количество отобранных колонок на каждой станции составляло 3 шт. для дальнейшего минералогического, гранулометрического и геохимического анализа. Дискретность разреза колонок из кутовой части губы Канда и оз. Федосеевское в верхних горизонтах до 16 см составляет 1 см, далее через 2 см. Для проб, отобранных на станциях, выполнялось измерение окислительно-восстановительного потенциала (Еh) донных отложений с помощью портативного иономера Анион 7050 (Анион, Россия). Измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) для двух других колонок проводилось после транспортировки в замороженном виде (до -18°C) в лабораторию. Всего было отобрано 90 проб донного осадка.

В лабораторных условиях замороженные поверхностные осадки помещались в перчаточный бокс, заполненный аргоном высокой чистоты. Часть проб в состоянии натуральной влажности отбиралась для экстракции форм нахождения металлов в инертной атмосфере аргона. А часть проб шла на сушку методом лиофильной сушки с дальнейшей растиркой в агатовой ступке до порошкообразного состояния.

Колонки донных осадков в лаборатории размораживались и сушились в лиофильной сушке Martin Christ Alpha 2–4 (Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, ФРГ). После чего, для достижения однородности и представительности анализируемых образцов и получения впоследствии релевантных результатов, выполнялось растирание проб донных отложений до порошкообразного состояния в агатовой ступке.

Элементный анализ донных осадков в кутовой части губы Канда был определен с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра СПЕКТРОСКАН МАКС-VGS: MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃общ., P₂O₅, S_{общ.}, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb. Для оценки содержания органического вещества были измерены потери при прокаливании (ППП).

Обсуждение результатов. Шхерный район вершины Кандалакшского залива – губа Канда был отделен фильтрующей дамбой от Белого моря. С началом Первой мировой войны резко активизировались работы по созданию железной дороги на Мурман. В конце 1916 г. была нарушена свободная связь губы Канда с Белым морем. При строительстве автодороги М18 «Кола» (Санкт-Петербург – Мурманск) в 1968 г через центральную часть губы Канда была построена еще одна фильтрующая дамба и мост. Водообмен между кутовой частью и остальной губой был резко ограничен. С тех пор происходит процесс изменения гидролого-гидрохимических и биологических условий в губе Канда [Саввичев и др., 2017, 2023].

В зимние и летние периоды 2015–2024 гг. были проведены инструментальные измерения гидролого-гидрохимических параметров и количественные характеристики интенсивности микробных процессов в водной толще и верхнем слое донных осадков в отделенных водоемах губы Канда, опубликованных в работах [Саввичев и др., 2017, 2023].

В кутовой части губы Канда проводились гидрологические исследования водной толщи в районе отбора колонки донных осадков. До глубины 14,5 м водоём полностью опреснён за счёт речного стока, талых вод и атмосферных осадков (рис. 2). Глубже происходит резкое увеличение солёности до 17,2 UPS на глубине 19 м. Окислительно-восстановительный потенциал имеет положительные значения в летний период до глубины 14,5 м (рис. 2). Для нижних слоёв характерны отрицательные значения до –365 мВ на глубине 19 м, что говорит об отсутствии перемешивания и анаэробных условиях.

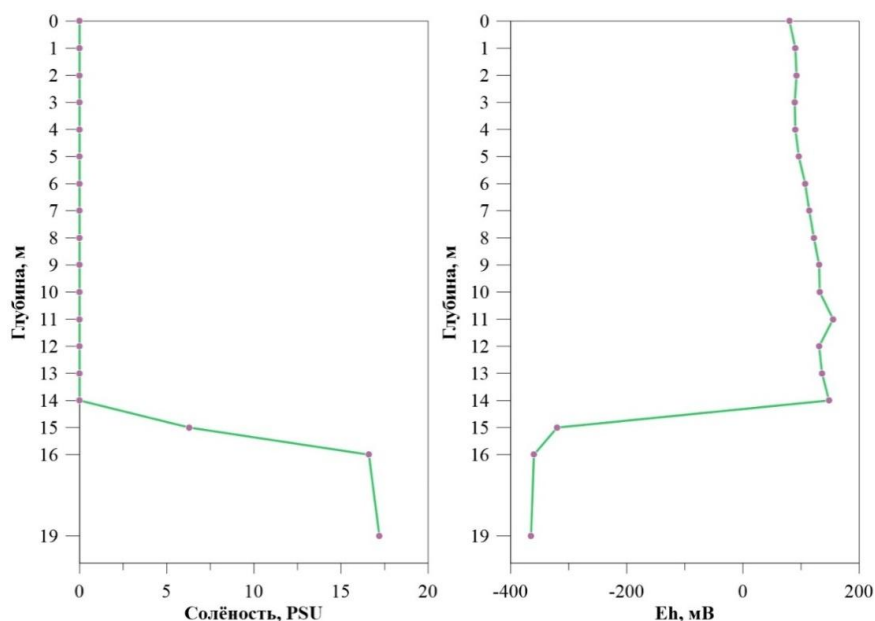


Рис. 2. Гидрологические характеристики водной толщи на станции отбора проб донных отложений в кутовой части губы Канды в августе 2023 г.

Донные осадки в верхней части колонки (до глубины 8 см) представлены чёрным пелитовым илом с запахом H₂S. Самые верхние из них сильно обводнены. На горизонтах 5–8 см найдены остатки наземной растительности. Вниз по колонке (8–22 см) осадки сменяются серыми пелитовыми и алевро-пелитовыми илами. Почти повсеместно, кроме горизонтов 11–13 см, присутствует запах H₂S. В различных участках также характерны: чёрные линзы (8–10 см); светло-бежевые/коричневые прослои и вкрапления (8–11 см, 13–

18 см); увеличенная доля песка (12–13 см, 18–22 см); примазки гидротроилита (13–18 см); с остатками наземной растительности (14–15 см, 16–18 см). На глубинах 22–33 см осадки представляют собой тёмно-серые маслянистые алевро-пелитовые илы с примесью песка и болотным запахом. Самые нижние части колонки (33–42 см) — оливковые алевро-пелитовые илы с чёрными прослоями и без запаха H_2S .

Значения Eh в донных осадках данной колонки варьируют в диапазоне $-250 - +78$ мВ. В большинстве горизонтов осадок находится в восстановительных условиях. Содержание органического углерода в целом росло вверх по колонке (рис. 3). Минимальная доля $C_{орг}$ – 3,27% на глубине 36–42 см, максимальная – 9,97% на глубине 0–1 см. Максимум серы (3,04%) приходится на горизонт 10–11 см.

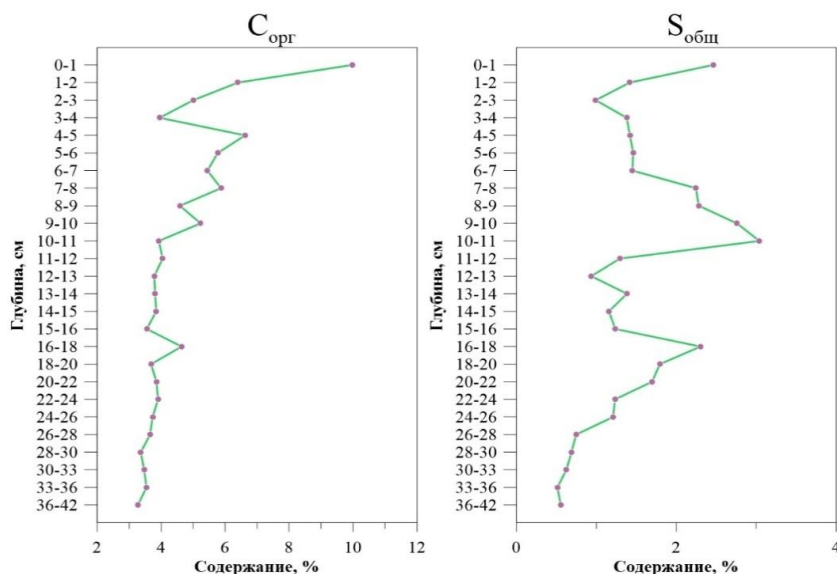


Рис. 3. Содержание углерода и серы в керне донных отложений, отобранного в кутовой части губы Канды в августе 2023 г.

Исходя из элементного состава осадков резкая смена режима осадконакопления соответствует горизонту 15–16 см. Исходя из этого скорость осадконакопления в верхней части донной колонки составляет 1,5–1,6 мм/год. Постепенное увеличение значений потери при прокаливании в верхней части колонки говорит об эвтрофикации водоема и появлении анаэробной зоны. Одновременные пики железа и серы говорят об отложении сульфидов в зоне сероводородного заражения (рис. 4).

Бассейн опытной Кислогубской приливной электростанции (ПЭС) – это губа Кислая, представляющая собой вытянутую узкую акваторию площадью 1,1 км². До сооружения Кислогубской ПЭС (в 1965–1968 гг.) водообмен с морем был свободный, прилив – правильный полусуточный. В 1968 г. была сдана в эксплуатацию первая и пока единственная в России экспериментальная ПЭС [Марфенин и др., 1995].

До строительства Кислогубской ПЭС исследователи отмечали богатство и разнообразие донной фауны всех биотопов. Биота имела морской облик, солоноватоводные элементы обитали в вершине губы. Опреснение резко увеличивалось при снижении водообмена до 20% и ниже во время двухсменной эксплуатации ПЭС и длительных ее остановок при закрытых водоводах. Во время строительства ПЭС устье губы Кислой 4 года было перекрыто дамбой, и бассейн ПЭС превращался в меромиктический водоем. Признаки сероводородного заражения вод и донных осадков отмечались и в средней части бассейна, и в его вершине глубже 15–20 м [Марфенин и др., 1995].

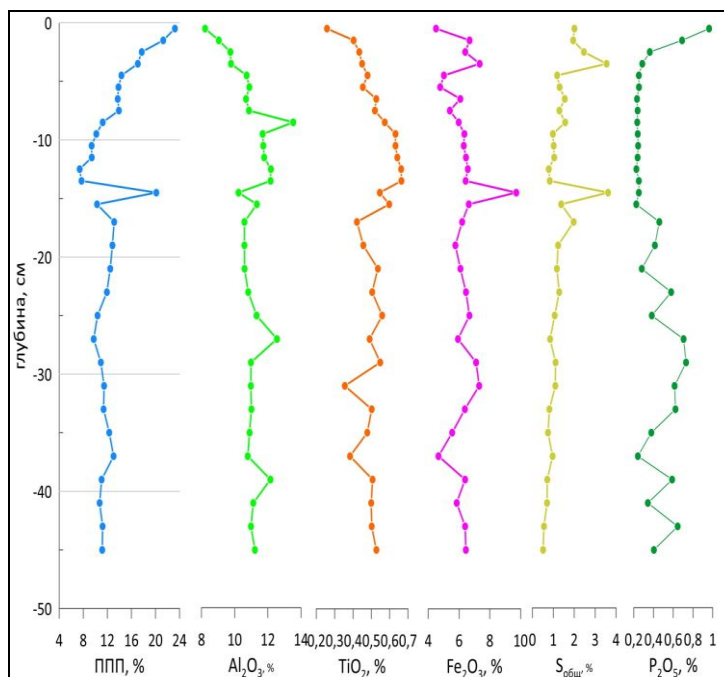


Рис. 4. Элементный состав донных осадков в водоеме кутовой части губы Канда в марте 2021 г.

В апреле 2024 г. сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова и Института микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН проведены исследования гидрологической структуры и микробных процессов в двух котловинах губы Кислой бассейна Кислогубской ПЭС. В самых глубоких частях котловин, глубины около 36 м, были отобраны по 3 колонки донных осадков. Было установлено, что придонный сероводородный слой отсутствовал. Признаки сероводородного заражения отмечались в верхнем слое донных осадков – гидротроилите, имеющего черный цвет, и связанный с деятельностью сульфидогенного микробного сообщества. Так как в последние годы остановлена плановая работа турбин Кислогубской ПЭС, то через открытые водоводы проходит постоянный приток морских вод. Адвекция холодных вод, насыщенных кислородом, достаточна для вентиляции придонных слоев губы Кислой и полного окисления сероводорода, который образуется в результате жизнедеятельности бактерий–сульфатредукторов. Ведутся исследования кернов донных осадков, отобранных в котловинах губы Кислой Баренцева моря.

В различные годы разрабатывались проекты превращения морских заливов в опресненные водоемы. В бассейне Баренцева моря в губе Долгой-Восточной ведутся изыскания и проектные работы по строительству Северной приливной электростанции.

Выводы. Практическая значимость исследования гидрологического режима и микробных процессов в водоемах, отделенных от основного морского бассейна, связана с необходимостью прогноза негативных последствий сероводородного заражения в искусственно замкнутых частях морских акваторий, появившихся в результате вмешательства человека, а также с реакцией морских экосистем на появление придонной аноксической зоны – тренда, наблюдаемого по всему Мировому океану. В связи с более быстрым протеканием биологических процессов в искусственных морских бассейнах из-за влияния технических сооружений на гидрологические характеристики, исследование антропогенных меромиктических водоемов может послужить моделью при реконструкции изменений прибрежных экосистем в процессе их природной изоляции от моря.

Благодарности. Исследования выполнены в ИО РАН в рамках Госзадания № FMWE–2024–0020.

ЛИТЕРАТУРА

Краснова Е.Д., Мардашова М.В. Как морской залив превращается в озеро // Природа. 2020. № 1 с. 16–27. doi:10.7868/S0032874X20010020

Марфенин Н.Н., Малютин О.И., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М., Усачев И.Н. Влияние приливных электростанций на окружающую среду. М.: МГУ, 1995. 125с.

Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 298 с.

Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Краснова Е.Д., Калмацкая О.В., Харчева А.И., академик РАН Иванов М.В. Микробные процессы в губе Канда – меромиктического водоема, искусственно отделенном от Белого моря // Доклады РАН. 2017. Т. 474. № 5. С. 637–641. doi:10.7868/S0869565217050243

Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Кадников В.В., Беленкова В.В., Русанов И.И., Горленко В.М. Состав микробных сообществ как индикатор состояния водоемов, расположенных на морском побережье (на примере залива Канда, Кандалакшский залив Белого моря) // Микробиология. 2023. Т. 92. № 6. С. 595–608. doi:10.31857/S002636562360032

BOTTOM SEDIMENTS IN THE MEROMICTIC RESERVOIRS IN THE KANDA BAY WHITE SEA AND KISLAYA BAY BARENTS SEA AT DIFFERENT STAGES OF ISOLATION

Demidenko N.A.

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

The aim of this study was to obtain quantitative hydrological characteristics, intensity of microbial processes and sedimentation conditions in the water column and upper layer of bottom sediments in the Kanda Bay and the basin of the Kislogubskaya tidal power plant. The results of studies in the meromictic reservoirs of the Kanda Bay, artificially separated from the Kandalaksha Gulf by a railway filtering dam at different stages of isolation, and the experience of the operation of the Kislogubskaya TPP and its impact on the basin regime, are an important factor in predicting the origin of hydrogen sulfide contamination during the separation of marine water bodies from the adjacent sea areas, the design of the Northern TPP in the Long Barents Sea Bay and the environmental consequences of the construction of protective dams and dikes, overpasses and embankments when laying roads.

Keywords: *Kanda Bay, Kislogubskaya TPP, meromictic reservoirs, hydrogen sulfide contamination, bottom sediments*

REFERENCES:

Krasnova E.D., Mardashova M.V. How the Sea bay turns into a Lake? // Pririda. 2020. No. 1. P. 16–27. doi:10.7868/S0032874X20010020

Marfenin N.N., Malutin O.I., Pantulin A.N., Pertsova N.M., Usachev I.N. Tidal power environmental impact. Moscow State University, 1995. 125 p. (in Russ.).

Relict Lake Mogylnoye. – L., Nauka, 1975. 298 p. (in Russ.).

Savvichev A.S., Demidenko N.A., Krasnova E.D., Kalmatskaya O.V., Kharcheva A.N., and Ivanov M.V. Microbial processes in the Kanda Bay, a meromictic water body artificially separated from the White Sea // Doklady Biol. Sci. 2017. Vol. 474. P. 135–139. doi:10.1134/S0012496617030103

Savvichev A.S., Demidenko N.A., Kadnikov V.V., Belenkova V.V., Rusanov I.I., Gorlenko V.M. 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. 2023. Vol. 92. No. 6. P. 819–830. doi:10.31857/S002636562360032