

ВНЕЗАПНЫЙ ЗАМОР БЕНТОСА ИЗ-ЗА ПОЯВЛЕНИЯ СУЛЬФИДНОЙ ЗОНЫ В ГУБЕ ЛОБАНИХА В АВГУСТЕ 2020 Г. (БЕЛОЕ МОРЕ, КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ)

Е.Д. Краснова¹, Д.А. Воронов², С.В. Пацаева¹,
Н.М. Кокрятская³, А.Э. Жадан¹, А.Б. Цетлин¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e_d_krasnova@mail.ru; spatsaeva@mail.ru;
azhadan@mail.ru; atzetlin@gmail.com

²Институт проблем передачи информации РАН, г. Москва, da_voronov@mail.ru
³ФИЦКИА УрО РАН им. Н.П. Лаверова, г. Архангельск, nkokr@yandex.ru

SUDDEN DEATH OF BENTHOS DUE TO APPEARANCE OF SULFIDE ZONE IN THE BAY LOBANIKHA IN AUGUST 2020 (WHITE SEA, KANDALAKHISKY BAY)

E.D. Krasnova¹, D.A. Voronov¹, S.V. Patsaeva¹,
N.M. Kokryatskaya⁴, A.E. Zhadan¹, A.B. Tzetlin¹

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

²Institute for Information Transmission Problems RAS, Moscow

³N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS, Arkhangelsk

Аннотация. В ковшовой губе Лобаниха (Белое море, о. Великий, Кандалакшский государственный природный заповедник) летом 2020 г. зарегистрировано появление сероводорода в придонной зоне до глубины 8 м и замор бентоса ниже этой глубины. Рассматриваются причины сезонной аноксии и ее последствия.

Ключевые слова: сезонная аноксия, бентос, ковшовая губа, стратификация.

Введение

В сентябре 2020 г. на западном побережье Камчатки произошел замор донной фауны, приоритетной версией его причин признан красный прилив. Для уверенного прогнозирования таких событий необходимо детальное документирование аналогичных сюжетов. Один такой случай представился нам летом 2020 г. при наблюдениях в ковшовой губе Лобаниха на острове Великом, принадлежащем Кандалакшскому государственному природному заповеднику (Белое море, Кандалакшский залив).

Объекты и методы

Ковшовая губа Лобаниха соединена с морем узким (100 м) мелководным проливом (максимальная глубина во время малой воды около 2 м). Губа состоит из двух лопастей-залитов: западного и восточного. В западной лопасти дно плоское, преобладающая глубина около 9,8 м, наибольшая глубина 13,5 м находится в центре на траверсе порога (66°33.354' С; 33°14.217' В). Восточная лопасть губы мелкая, наибольшая глубина в ее центре 1,3 м. В губу впадает несколько ручьев, причем один – достаточно мощный для заметного опреснения поверхностного слоя, что создает условия для плотностной стратификации.

Наблюдения за губой Лобаниха начаты в августе 2014 г. В 2020 г. губа обследована 18 июля, 19 и 20 августа, 4, 9 и 20 сентября и 9 октября. В самой глубокой точке во время малой воды производили зондирование для определения *in situ* температуры, солёности, редокс-потенциала, концентрации растворенного в воде кислорода и освещенности. С помощью погружного насоса с разной глуби-

ны отбирали пробы воды для изучения массовых форм микроорганизмов, для гидрохимических исследований и измерения спектров поглощения воды.

Результаты

Данные о температуре и солености воды в 2014 и 2020 г. указывают на наличие вертикальной стратификации. В августе 2014 г. начиная с глубины 9 м залегала более соленая холодная вода. В 2020 г. мы зарегистрировали не только вертикальную стратификацию, но и ее изменения в течение сезона (рис. 1).

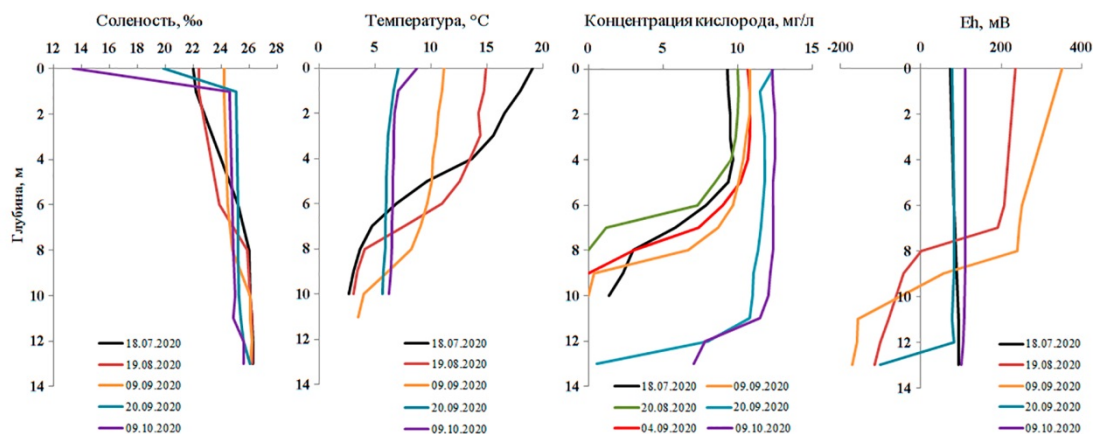


Рис. 1. Вертикальные профили температуры и солености, концентрации растворенного кислорода и окислительно-восстановительного потенциала в губе Лобаниха летом 2020 г.

Поверхностный слой до глубины 1 м хорошо прогревается в теплое время года, температура воды в нем на 1,5–2 градуса больше, чем на глубине 2 м. Прогрев распространяется до глубины 4–5 м, ниже располагается термоклин. В июле и августе 2020 г. термоклин четкий и заканчивался на глубине 8 м, ниже которой находилась холодная водная масса с большей соленостью. Соленость воды над термоклином летом постепенно увеличивается, а осенью из-за дождей у поверхности возникает тонкий опресненный слой (менее 20 см) с соленостью на 5–10 единиц меньше, чем в нижележащей водной толще.

В конце сентября термоклин разрушается, температура и соленость по столбу воды выравниваются, однако возле дна сохраняется слой с повышенной соленостью.

Концентрация растворенного кислорода над термоклином соответствует уровню насыщения; в теплое время года она меньше, в холодное – увеличивается. Термоклин служит также хемоклином – зоной резкого уменьшения содержания кислорода. В июле кислород распространялся до самого дна, благодаря чему даже в самом глубоком месте, были хорошие условия для существования бентоса. Однако через месяц мы застали совсем иную картину: кислород заканчивался на глубине 8 м, а ниже сформировалась сероводородная анаэробная зона. При водолажном обследовании дна оказалось, что бентос погиб. Животные, обитающие в толще грунта, выползли на его поверхность и лежали мертвыми.

Через полмесяца термоклин опустился на 2 м и аэрированный слой увеличился с 8 м до 10 м, а еще через полмесяца – до глубины 12 м. При последнем обследовании 9 октября сульфидная зона исчезла и кислород снова доходил до дна.

В августе 2020 г. следы сероводорода аналитически регистрировались с глубины 7,25 м. Более заметная концентрация сероводорода начиналась с 7,75 м и нарастала ко дну. Наибольшее значение 0,61 мг/л зарегистрировано в придонном слое. Для морских эксинных водоемов такое количество сероводорода можно считать небольшим [2], однако оно достаточно для гибели аэробных организмов и разрушения прежде существовавшего донного сообщества. В сентябре, когда зона распространения сероводорода уменьшилась, в придонном слое его концентрация достигла 4,1 мг/л.

Мы отследили, как развивается сообщество микроорганизмов хемоклина – пограничной зоны между слоями воды с разной плотностью. В июле высокая концентрация клеток отмечена в зоне термоклина. В нем присутствовали крупные центрические диатомеи, силикофлагелляты *Dyctiocha*, криптофитовые жгутиконосцы *Rhodomonas*, характерные для хемоклина стратифицированных водоемов. Силикофлагелляты, как и криптофитовые, – миксотрофы, то есть способны как к фотосинтезу, так и к гетеротрофному типу питания.

В августе цветение силикофлагеллят закончилось. По всему столбу воды были многочисленны крупные диатомеи. На глубине 7,5 м появились динофлагелляты *Amphidinium*, которые нередко обитают в хемоклине стратифицированных водоемов. В сероводородной зоне фитопланктон отсутствовал, но в пробах было много нитевидных образований, напоминающих грибные гифы, облепленные бактериальными клетками. По направлению вниз их количество возрастало, а ниже 11 м они образовывали большие сплетения. Появление в планктоне этих нитей связано с происшедшим замором, но их природа нам пока не ясна. Ниже 8 м было много бактерий.

В начале сентября аэробная зона от 7,5 м до 8,2 м характеризовалась присутствием мелких зеленых жгутиконосцев. На 8,3 м появилось большое количество инфузорий разных видов. На 8,4 м они исчезли и остались лишь немногочисленные инфузории *Euplotes*, которые встречались до глубины 8,6 м. С этой же глубины появились фрагменты альго-бактериального мата, напоминавшего нетканое полотно, инкрустированное пеннатыми диатомеями. Инфузории *Euplotes* характерны для хемоклина некоторых других прибрежных беломорских водоемов (Е.Д. Краснова, неопубл. данные).

В конце сентября слоя с богатой фауной инфузорий не было. Лишь в десятисантиметровом слое при переходе из аэробной зоны в анаэробную встречены инфузории *Euplotes*. Загадочные «гифы» встречались по всему столбу воды, включая самый поверхностный, но возле дна их было больше.

В октябре фитопланктон стал бедным и выровнялся по всей толще воды.

Весь сезон на всех глубинах вода была бесцветной и прозрачной. Судя по измерениям освещенности, в губе Лобаниха нет мутных слоев, в том числе слоя с аноксигенными фототрофами в хемоклине. В дневное время свет доходит до дна.

Спектры поглощения света (рис. 2) указывали на отсутствие в сентябре слоев с массовым развитием фотосинтезирующих микроорганизмов на всех горизонтах. В зоне редокс-перехода на 9,2 и 9,3 м наблюдалось повышенное поглощение света по всему диапазону длин волн, что свидетельствует о присутствии взвеси без окраски и связано с альго-бактериальным матом.

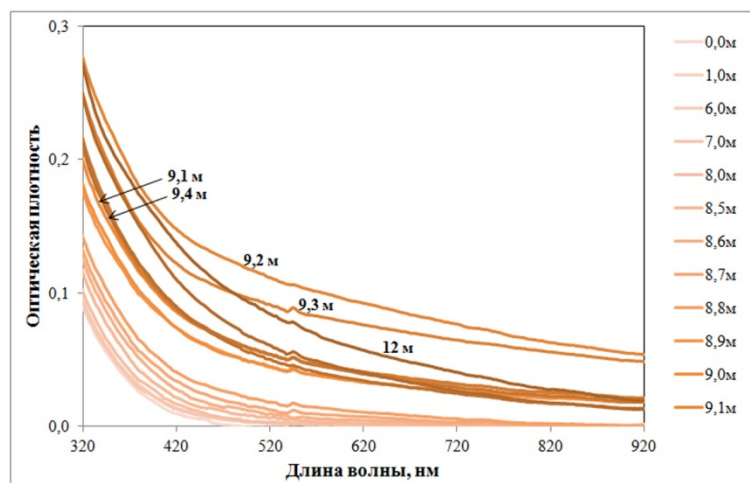


Рис. 2. Спектры поглощения света в пробах воды от 9 сентября 2020 г. из губы Лобаниха.

После появления анаэробной зоны нас заинтересовало состояние донных сообществ. 19 августа до глубины 7,0–7,5 метров донное население было в обычном состоянии. Ниже вся поверхность илистого дна была покрыта мертвыми животными, выползшими из своих норок и трубок: полихетами *Terebellides stroemi*, *Alitta virens*, *Polycirrus medusa*, двустворчатыми моллюсками и др. Судя по внешнему виду мертвых беспозвоночных, их гибель произошла совсем недавно. В конце сентября у лежащих на дне беспозвоночных появились признаки разложения. На поверхности осадка образовалась пленка из серных бактерий.

Обсуждение результатов

Помимо постоянно существующих мертвых зон, связанных с сероводородным заражением глубинных вод, например, в Мексиканском и Чесапикском заливах и в Балтийском море, на морских акваториях все чаще регистрируют случаи сезонной гипоксии [1, 3, 4, 7]. Обычно это связывают с эвтрофикацией, однако в губе Лобаниха эвтрофикация исключена ввиду отсутствия хозяйственной деятельности на заповедном острове.

Аноксия в губе Лобаниха совпала по времени с подъемом зоны сероводорода в ковшовой бухте Биофильтров, расположенной в 3,5 км к юго-западу на полуострове Киндо. В бухте Биофильтров анаэробная зона существует в течение всего года, но граница распространения сероводорода меняется. 28 июля она находилась на глубине 8,25 м, а 21 августа поднялась больше, чем на 1 м. По всей видимости, синхронная сероводородная вспышка в соседних губах имеет общие причины и связана с отмиранием фитопланктона, послужившим субстратом для бактериальной сульфатредукции.

Похожие сероводородные ямы обнаружены на мелководье одной из морских бухт на острове Корнуол в Канадском Арктическом архипелаге; их назвали «черными бассейнами» («black pools») из-за черного цвета воды [5]. В них аноксия является следствием плотностной стратификации, которая препятствует вертикальной циркуляции. То есть мертвые зоны могут появляться и без участия антропогенного фактора.

В отсутствие дополнительного поступления биогенных элементов в губе Лобаниха сероводородное заражение продержалось недолго. Уже через полме-

сяца граница сероводорода опустилась на 1 м, через месяц – на 5 м. При осеннем похолодании термоклин разрушился, произошла вертикальная циркуляция, кислород снова распространился до дна. С точки зрения гидрохимии и гидрологии водоем восстановился, однако бентосное сообщество погибло. Наблюдения за восстановлением бентоса после случаев аноксии в других морях показывают, что на это требуются многие годы [6, 7, 8].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00377). Авторы признательны администрации Кандалакшского заповедника за возможность работать на его акватории.

Литература

- [1] Заика В.Е., Коновалов С.К., Сергеева Н.Г. Локальные и сезонные явления гипоксии на дне Севастопольских бухт и их влияние на макробентос // Морской экологичный журнал. 2011. № 3. – С. 15-25.
- [2] Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. В печати.
- [3] Стунжас А., Тищенко П.Я., Ивин В.В., Барабанщиков Ю.А., Волкова Т.И., Вышкварцев Д.И., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Ходоренко Н.Д., Швецова М.Г., Головченко Ф.М. Первый случай аноксии в водах Дальневосточного морского заповедника // Океанология. 2016. Т. 467, № 2. – С. 218-221.
- [4] Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И., Сергеев А.Ф., Волкова Т.И., Колтунов А.М., Михайлик Т.А., Сагалаев С.Г., Тищенко П.П., Швецова М.Г. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // Известия ТИНРО. 2011. Т. 165. – С. 136-157.
- [5] Kvitek R.G., Conlan K.E., Iampietro P.J. Black pools of death: hypoxic, brine-filled ice gouge depressions become lethal traps for benthic organisms in a shallow Arctic embayment // Marine Ecology Progress Series. 1998. V. 162. – P. 1-10.
- [6] Rosenberg R. Eutrophication in marine waters surrounding Sweden – a review. Swedish National Environment Protection Board. Report. 1986. V. 3054. – P. 1-137.
- [7] Stachowitsch M. Anoxia in the Northern Adriatic Sea: rapid death, slow recovery // Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia. Geol. Soc. Spec. Publ. 1991. V. 58. – P. 119-129.
- [8] Steimle F.W., Radosh D.J. Effects on the benthic invertebrate community // Oxygen Depletion and Associated Benthic Mortalities in New York Bight, 1976. National Oceanic and Atmospheric Administration Professional Paper. 1979. V. 11. – P. 281-293.

S u m m a r y. In the scoop-like bay Lobanikha (White Sea, Island Veliky, Kandalaksha State Nature Reserve) in the summer of 2020, the appearance of hydrogen sulfide in the bottom zone to a depth of 8 m was registered. It caused the mortality of the benthos below this depth. The causes of the seasonal anoxia and its consequences are discussed.