

УДК 551.579.68

МИКРОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГУБЕ КАНДА – МЕРОМИКТИЧЕСКОМ ВОДОЁМЕ, ИСКУССТВЕННО ОТДЕЛЁННОМ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

© 2017 г. А. С. Саввичев^{1,*}, Н. А. Демиденко², Е. Д. Краснова³,
О. В. Калмацкая⁴, А. Н. Харчева⁴, академик РАН М. В. Иванов¹

Поступило 01.03.2017 г.

С помощью микробиологических и биогеохимических исследований в южной части губы Канда – искусственном водоёме, отделённом от Белого моря дамбой, возведённой при строительстве железной дороги, найдены признаки меромиксии. Концентрация сероводорода в придонном водном слое достигала 1,9 ммоль/л, интенсивность процесса микробной сульфатредукции – 3,0 мкмоль серы/л · сут. Концентрация растворённого метана – 3,7 мкмоль/л. Изотопный состав углерода метана ($\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4) = -79,2\text{‰}$) свидетельствовал о его микробном генезисе. Губа Канда является в настоящее время единственным в России рукотворным внутренним морским водоёмом, для которого получены данные о скорости микробных процессов, ответственных за возникновение придонного водного слоя, содержащего сероводород и метан.

DOI: 10.7868/S0869565217050243

Среди озёр морского происхождения, возникших в результате отделения от моря лагун и заливов, выделяются водоёмы, получившие название меромиктических. Меромиктические водоёмы характеризуются наличием анаэробной зоны в мони-молимнионе. Анаэробные условия создаются, как правило, за счет протекания микробных процессов деструкции органического вещества, вызывающих исчерпание растворённого кислорода. В присутствии сульфат-ионов в мони-молимнионе таких водоёмов активизируются процессы микробной сульфатредукции, сопровождающейся образованием сероводорода. Активизация процесса сульфатредукции описана для морских водоёмов в разной степени изолированных от открытого моря. Стабильная анаэробная зона водной толщи существует в меромиктическом оз. Могильное на о-ве Кильдин, в фиорде Фрамварен в южной Норвегии, Чёрном море [1–4]. Менее стабильная анаэробная обстановка характерна для двух глубоководных

впадин Каспийского моря [5]. Многочисленные стратифицированные водоёмы небольшого размера известны на побережье Кандалакшского залива Белого моря. Они уникальны по происхождению, так как образуются путём отделения от моря из-за быстрого поднятия суши (около 40 см за последние сто лет) и дальнейшего опреснения [6, 7]. По мере отдаления от моря происходит закономерная смена морской биоты на пресноводную, ослабление промывного режима ведёт к накоплению значительного количества осадков и распространению сероводорода в толще мони-молимниона [8]. Сульфатредуцирующие бактерии не ограничивают перечень анаэробных микроорганизмов, участвующих в трансформации органических соединений. В анаэробных условиях образование метана обеспечивают метаногенные археи, участвующие наряду с сульфатредуцирующими бактериями в терминальной фазе разложения органического вещества [2].

Сероводородное заражение характерно также для искусственно отделенных морских акваторий, таких как губа Кислая на Западном Мурмане. Процесс заражения происходил в течение четырёх лет строительства Кислогубской ПЭС, когда её бассейн был отделён от моря временной дамбой [9], а также в водах губы Долгая (Глубокая) на Соловецком о-ве, в 1856 г. отделённой от Онежского залива искусственной дамбой [10]. Актуальность исследования подобных водоёмов обусловлена, прежде всего, необходимостью прогноза негативных последствий сероводородного

¹ Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского
Федерального исследовательского центра
“Фундаментальные основы биотехнологии”
Российской Академии наук, Москва

² Государственный океанографический институт
им. Н.Н. Зубова, Москва

³ Беломорская биологическая станция им. Н.А. Перцова
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

⁴ Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

*E-mail: savvichev@mail.ru

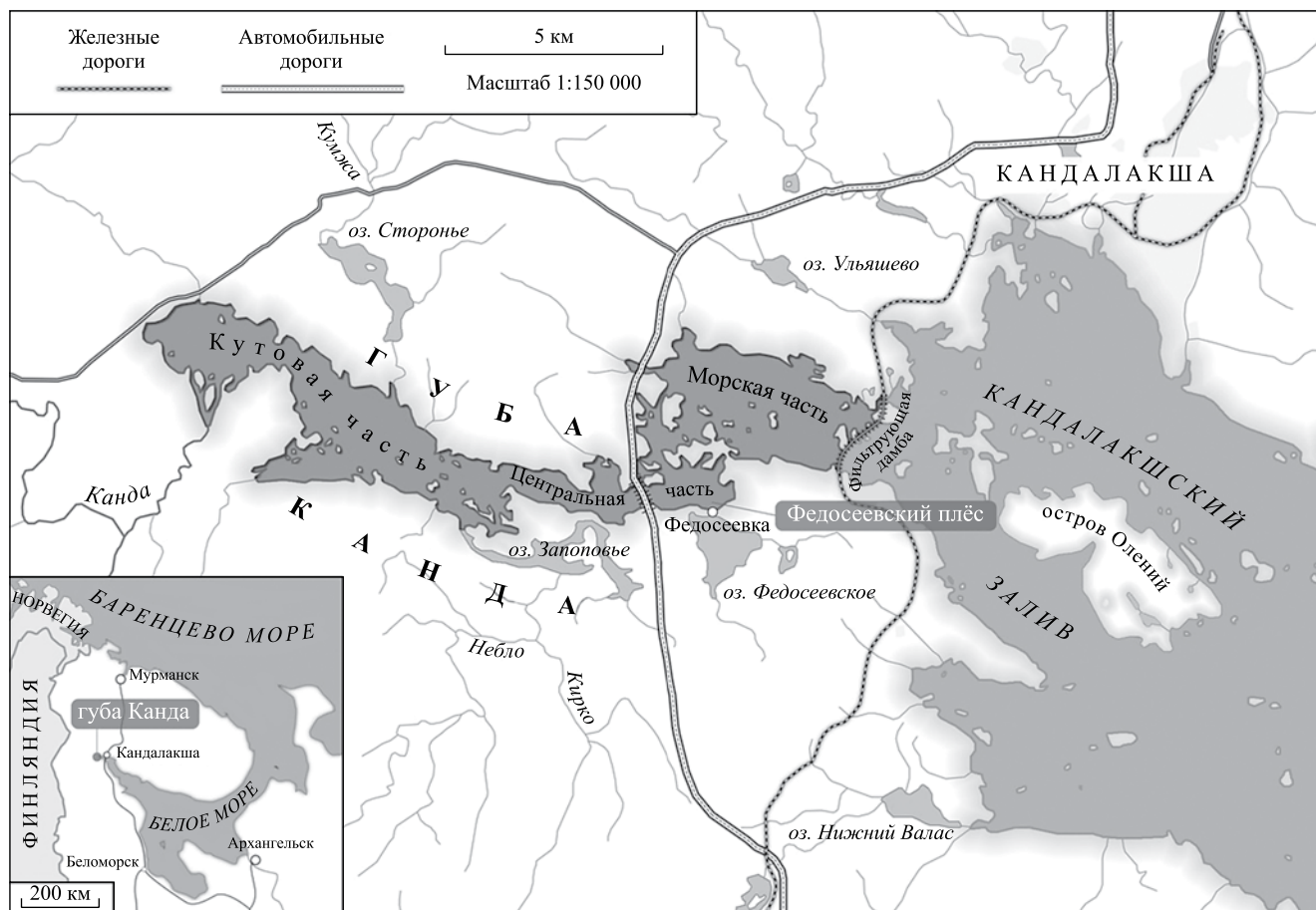


Рис. 1. Карта-схема губы Канда.

заражения в морских акваториях, появившихся в результате строительства дамб, плотин, приливных электростанций и т.д.

Бассейн губы Канда является искусственным водоёмом, поскольку с 1916 г. акватория со сложной береговой линией отделена от Кандалакшского залива Белого моря дамбой, возведённой при строительстве железной дороги [11]. В губу впадает река Канда и множество ручьёв. Губа Канда относится к внутренним морским водам Российской Федерации. Участок железной дороги, пересекающий губу Канда, строился с сентября 1915 по ноябрь 1916 г. На морском мелководье была возведена фильтрационная дамба. В основу конструкции закладывались крупные валуны, далее по мере наращивания дамбы использовались более мелкие валуны и камни. В результате вода во время приливов и отливов могла проходить сквозь тело дамбы. Для прохода мелких судов и рыбы была оставлена протока, через которую был построен однопролётный мост. Во время Второй мировой войны в 1942 г. протока, соединяющая губу с морем, была засыпана. Это было связано с тем, что немецкая авиация в первую очередь бомбила

мосты. В результате связь водных масс губы Канда с морем стала очень слабой и осуществлялась только при фильтрации через тело плотины. В 1972 г. в теле дамбы был построен рыбоход – водопропускное сооружение. Водообмен губы Канда с морем немного увеличился, и в водоем снова смогли заходить морские и проходные рыбы. Антропогенные преобразования губы вызвали изменения её гидрологического и гидрохимического режимов. По данным института СеврыбНИИпроект (г. Петрозаводск) в 1981–1982 гг. в губе Канда существовала выраженная стратификация вод с пресным поверхностным слоем и заполненными соленой водой глубоководными застойными зонами со значительной концентрацией растворённого сероводорода [11]. Фильтрующая железнодорожная дамба через губу находится в 700 м от границ водно-болотного угодья международного значения “Кандалакшский залив” и границ Кандалакшского заповедника. В связи с этим необходим регулярный мониторинг за изменениями, происходящими в губе Канда.

Целью настоящего исследования было получение объективных количественных характеристик

интенсивности микробных процессов – регуляторов циклов углерода и серы в водной толще губы Канда. Ранее микробиологические и биогеохимические исследования в губе Канда не проводились.

Материалы для исследований получены в январе 2015 г. и феврале–марте 2016 г. Зондирование и отбор водных образцов осуществляли с поверхности льда. Исследования морской и кутовой акваторий губы Канда показали, что водная толща локальных ям (рис. 1) содержит растворённый кислород во всём слое от подлёдного горизонта и до дна. При этом в поверхностном слое осадка признаки сероводорода отсутствовали. Однако в центральной части Федосеевского плёса (южная часть губы Канда, рис. 1) мы зарегистрировали все признаки меромиксии (рис. 2).

Опреснённый слой водной толщи соответствовал подлёдному водному слою. Гало- и термоклин были выражены слабо и находились на глубине 9–10 м (рис. 2а). Окислительно-восстановительный потенциал резко изменялся в пределах этого горизонта. Содержание кислорода в подлёдном слое соответствовало 0,3 ммоль/л, глубже концентрация O_2 плавно снижалась до минимальных значений на глубине 10 м (0,03 ммоль/л, рис. 2б). На глубине 11 м концентрация сероводорода составила 0,42 ммоль/л, а в придонном слое – 1,93 ммоль/л. Распределение тяжёлых металлов по глубине (рис. 2в) контролируется двумя процессами [12]: окислением двухвалентных форм марганца и железа в миксолимнионе (расстояние от поверхности до 8 м) с образованием коллоидных частиц (главным образом оксигидроксидов железа (III) с захваченными в результате соосаждения и сорбции другими металлами), скорость осаждения которых в слое галоклина резко снижается, приводя к возникновению локального максимума концентраций; восстановлением окисленных форм Mn(IV) и Fe(III) в зоне сульфатредукции (ниже 12 м) с образованием менее растворимых соединений, вероятно, сульфидов железа, также

захватывающих в качестве примесей металлы, имеющие сродство с железом (Co, Zn, Pb и Cd). Концентрации минерального и органического фосфора (рис. 1г) в поверхностном горизонте до глубины 8 м были минимальны (0,012–0,014 мг/л), увеличиваясь до 0,12 мг/л на глубине 10 м и резко возрастающая в придонных горизонтах (до 3,8 мг/л для $P_{\text{мин}}$ и 0,19 мг/л для $P_{\text{орг}}$).

Общая численность микроорганизмов (ОЧМ, выражается в количестве клеток в 1 мл) в миксолимнионе Федосеевского плёса (0,45–0,65 млн клеток/мл) соответствовала значениям, обычным для зимнего сезона в олиго-мезотрофных водоёмах. В слое хемоклина величина ОЧМ достигала локального максимума (1,65 млн клеток/мл), что свойственно меромиктическим водоёмам. Результаты экспериментов с добавкой $Na_2^{35}SO_4$ показали, что во всех пробах сероводородной воды происходит процесс микробной сульфатредукции, интенсивность которого достигала 3,0 мкмоль S на литр в сут. При этом концентрация сероводорода в придонном водном слое достигала 1,9 ммоль/л (рис. 2д). Из этого следует, что сероводород, присутствующий в глубинных водах Федосеевского плёса, не мог образоваться за один зимний сезон.

Концентрация растворённого метана в миксолимнионе изменялась от 19 до 29 нмоль/л, что немного превышало его содержание в атмосфере (рис. 2е). В слое хемоклина и придонном водном слое концентрация растворённого метана достигала 2,8–3,7 ммоль/л. Характер распределения содержания метана указывает на его поступление из донных отложений. Изотопный состав углерода растворённого метана из придонного водного горизонта ($\delta^{13}C (CH_4) = -79,2\%$) свидетельствует о его современном микробном генезисе. При этом содержание лёгкого изотопа углерода метана в слое хемоклина было меньше, чем соответствующие величины в нижележащих горизонтах ($\delta^{13}C (CH_4) = -70,4\%$, рис. 2е). Такое изменение изотопного состава углерода метана

Таблица 1. Сравнительная характеристика показателей анаэробности в миксолимнионе Федосеевского плёса и в известных меромиктических водоёмах

Водоём	Месяц и год съёмки	H_2S , ммоль/л	CH_4 , мкмоль/л	СР*, мкмоль/л · сут	Источник данных
Оз. Шири	Февраль 2001 г.	0,3–0,5	0,3–0,6	0,4–0,7	[13]
Оз. Шунет	Февраль 2001 г.	2,0–3,8	20–36	4,5–6,2	[13]
Оз. Могильное	Март 2002 г.	0,9–3,0	10–16	3,0–4,9	[2]
Губа Канда	Январь 2015 г., февраль 2016 г.	1,0–1,9	2–3,5	1,4–3,0	Настоящее сообщение

*СР – интенсивность сульфатредукции.

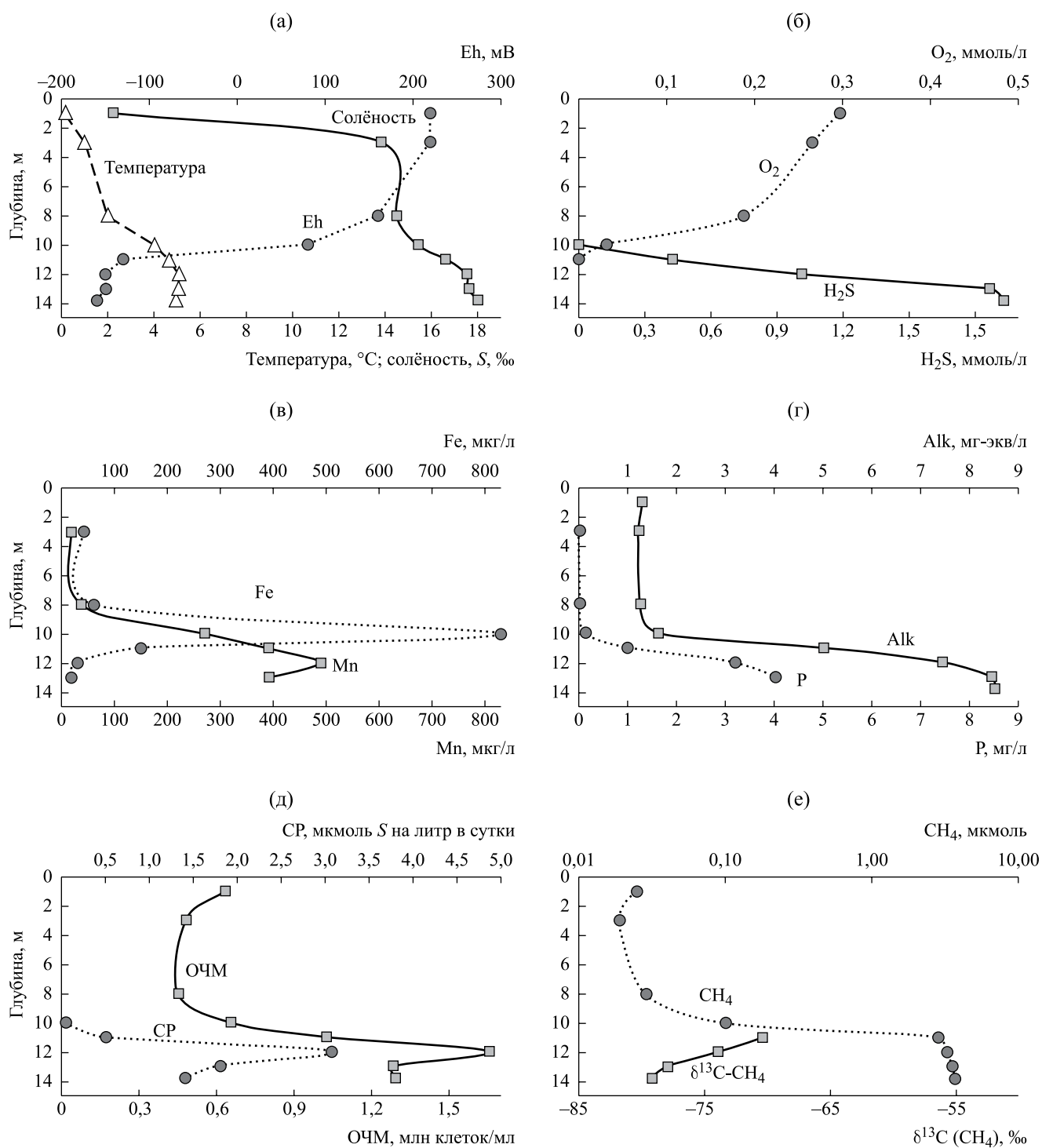


Рис. 2. Основные гидрологические, биогеохимические, микробиологические и изотопно-геохимические характеристики водной толщи Федосеевского плёса губы Канда. (а) – температура, солёность, S, величина окислительно-восстановительного потенциала, Eh; (б) – концентрация кислорода и сероводорода; (в) – концентрация железа и марганца (сумма растворённой и коллоидной фракций); (г) – величина щелочного резерва, Alk, концентрация общего (минерального и органического) фосфора, P; (д) – общая численность микроорганизмов, ОЧМ, интенсивность процесса сульфатредукции, СР; (е) – концентрация метана и изотопный состав углерода метана, $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$.

свидетельствует об эффекте фракционирования, возникающего при микробном потреблении преимущественно лёгкого изотопа углерода.

Уместно сравнить основные количественные показатели, характеризующие уровень гипоксии (содержание сероводорода, метана, а также интенсивность сульфатредукции), в гиполимнионе Федосеевского плёса с соответствующими данными [13], известными для наиболее изученных меромиктических водоёмов (табл. 1). Сравнительный анализ показал, что по уровню гипоксии Федосеевский плёс несколько уступает таковому оз. Могильное, а также эвтрофного континентального оз. Шунет (зимняя съёмка), но при этом заметно “опережает” по этому показателю оз. Шира (зимняя съёмка).

Отсутствие анаэробных вод в локальных понижениях русла р. Канда в пределах морской и кутовой акваторий губы Канда указывает на эффективность водообмена через фильтрующуюся дамбу и открытый водоток. Федосеевский плёс, вероятно, является реликтовым водоёмом, сохранившим слой гиполимниона в палеорусле р. Канда после строительства глухой дамбы (рис. 1). Таким образом, губа Канда является в настоящее время единственным в России рукотворным внутренним морским водоёмом, для которого получены количественные данные скорости микробных процессов, ответственных за возникновение и поддержание анаэробного водного слоя, содержащего сероводород и метан.

Авторы благодарны Н.М. Кокрятской и А.В. Савенко за проведение химико-аналитических исследований и Т.Е. Самсонову за подготовку картографических материалов.

Исследования проведены при финансовой поддержке грантов РФФИ (14–04–00682, 14–04–01093 и 16–05–00548) и РНФ (14–37–00038 и 16–14–10201).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерюгин К.М. // Тр. Петергоф ест.-научн. ин-та. 1925. № 2. С. 1–112.
2. Иванов М.В., Русанов И.И., Пименов Н.В. и др. // Микробиология. 2001. Т. 70. № 5. С. 675–686.
3. Strelkov P., Shunatova N., Fokin M. et al. // Polar Biol. 2014. V. 37. P. 297–310. DOI 10.1007/s00300-013-1431-4.
4. Dyrssen D.W., Hall P.O.J., Haraldsson C. // Aquatic Geochem. 1996. V. 2. P. 111–129.
5. Иванов М.В., Саввичев А.С., Ключиткин А.А. и др. // ДАН. 2013. Т. 453. № 1. С. 76–81.
6. Пантюлин А.Н., Краснова Е.Д. В сб.: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: Геос, 2011. Т. III. С. 241–245.
7. Krasnova E., Kharcheva A., Milutina I., et al. // J. Mar. Biol. Ass. UK. EMBS Europ. Mar. Biol. Symp. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0025315415000582>
8. Losyuk G., Kokryatskaya N., Krasnova E. // EARSel Proc. 2015. V. 14. P. 49–54. DOI: 10.12760/02-2015-1-07.
9. Семенов В.Н. Систематика и экология морских бассейнов Севера на разных этапах изоляции. Апатиты: Изд-во ММБИ КФ АН СССР, 1988. 46 с.
10. Нинбург Е.А. // Природа. 1990. № 7. С. 44–49.
11. Иванов Н.О., Китаев В.П., Чеченков А.В. В сб.: Итоги и перспективы изучения биологических ресурсов Белого моря. Л.: ЗИН АН СССР, 1983. С. 37–44.
12. Савенко А.В., Демиденко Н.А., Саввичев А.С., Покровский О.С. В сб.: Материалы XXI Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. М.: Геос, 2015. Т. III. С. 271–275.
13. Саввичев А.С., Русанов И.И., Rogozin D.Yu. и др. // Микробиология. 2005. Т. 74. № 4. С. 552–561.