

УДК 595.142.2:591.4

НАХОДКИ СИБОГЛИНИД (ANNELIDA, SIBOGLINIDAE) В ЭСТУАРИЯХ КРУПНЕЙШИХ РЕК АРКТИКИ СВЯЗАНЫ С ГАЗОГИДРАТАМИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

© 2023 г. Н. П. Карасева¹, Н. Н. Римская-Корсакова¹, В. Н. Кокарев², М. И. Симаков³, Р. В. Смирнов⁴, М. М. Ганцевич^{1,*}, академик РАН В. В. Малахов¹

Поступило 08.11.2022 г.

После доработки 25.11.2022 г.

Принято к публикации 26.11.2022 г.

В эстуариях крупнейших рек Арктики, а именно, Енисея, Лены и Маккензи, обнаружены бескислородные морские черви семейства Siboglinidae. Их метаболизм обеспечивается симбиотическими хемоавтотрофными бактериями. Сильная стратификация по солености, характерная для эстуариев крупнейших арктических рек, обеспечивает высокую соленость на глубинах 25–36 м, где были обнаружены сибоглиниды. Высокие концентрации метана, необходимые для метаболизма сибоглинид, возникают в результате диссоциации газогидратов многолетнемерзлых пород под влиянием речного стока в условиях потепления Арктики

Ключевые слова: Siboglinidae, эстуарии, Енисей, Лена, Маккензи, газогидраты, многолетнемерзлые породы, потепление Арктики

DOI: 10.31857/S2686738922600832, **EDN:** LZIRJL

Морские черви семейства Siboglinidae Caullery 1914 лишены рта и кишечника, их метаболизм целиком обеспечивается симбиотическими хемоавтотрофными бактериями, способными окислять метан или сероводород [1]. В восстановительных условиях в толще осадка происходит микробиологическое окисление метана с участием сульфатов, растворенных в морской воде [2]. Высокие концентрации сероводорода, возникающие в капиллярной воде морского осадка, обеспечивают жизнедеятельность сибоглинид с сульфид-окисляющими симбионтами в районах метановых просачиваний [3, 4]. Это позволяет сибоглинидам независимо от типа симбионтов использовать метан как источник энергии и делает их индикаторами углеводородных просачиваний различного генезиса [5].

Сибоглиниды — преимущественно глубоководные организмы, никогда не встречающиеся в

опресненных районах Мирового океана [1, 5]. Тем не менее еще в 1962 г. вид *Galathealinum arcticum* был найден в приустьевом районе крупнейшей реки канадской Арктики — р. Маккензи [6]. В настоящей статье приводятся данные о находках трех других видов сибоглинид в эстуариях крупнейших рек, впадающих в арктические моря России. Цель настоящей работы — попытаться ответить на вопрос, какие особенности среды позволяют сибоглинидам обитать в приустьевых районах крупнейших арктических рек, которые характеризуются низкой поверхностной соленостью.

В ходе гидробиологических работ в 59-м, 66-м и 78-м рейсах научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в 2011, 2016 и 2019 г. соответственно были сделаны находки сибоглинид в эстуариях крупнейших рек, впадающих в моря российского сектора Арктики. Пробы были собраны на илистых грунтах дночерпателем с площадью захвата 0.1 м². Названия видов, координаты мест находок, глубины и даты сборов приведены в табл. 1.

В Енисейском заливе Карского моря между о. Сибирякова и западным берегом полуострова Таймыр найдено два вида сибоглинид: *Galathealinum karaense* — на глубине 25 м и *Crispabrachia yenisey* на глубине 28 м (рис. 1). Поверхностная средняя многолетняя соленость в этом районе

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Факультет биологических наук и аквакультуры, Северный университет, Буде, Норвегия

³ Институт океанологии имени П.П. Ширинова Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: mgantsevich@gmail.com

Таблица 1. Находки сибоглинид в эстуариях крупнейших рек Арктики

№	Вид	Район	Координаты	Глубина	Дата сбора
1	<i>Crispabrachia yenisey</i> Karaseva et al., 2021	Карское море, эстуарий р. Енисей	73° 10' 00" с.ш. 79° 53' 30" в.д.	28 м	27.07.2016
2	<i>Galathealinum karaense</i> Smirnov et al., 2020	Карское море, эстуарий р. Енисей	73° 10' 13" с.ш. 79° 51' 48" в.д.	25 м	20.09.2011
3	<i>Oligobrachia haakonmos- biensis</i> Smirnov, 2000	Море Лаптевых, эстуа- рий р. Лена	73° 09' с.ш. 130° 28' в.д.	25 м	10.10.2019
4	<i>Galathealinum arcticum</i> Southward, 1962	Море Бофорта, эстуа- рий р. Маккензи	69° 32' с.ш. 138° 57' з.д.	36 м	25.08.1960

менее 5‰, однако, уже на глубине 10 м приближается к 30‰, а придонная соленость достигает 32.5‰ [7–9]. Как известно, основные запасы углеводородов в Мировом океане сосредоточены в виде газогидратов метана [10].

Залежи газогидратов в Арктике подразделяются на два типа. К первому типу относятся донные газогидраты, встречающиеся на батимальных глу-

бинах в Арктическом бассейне. Ко второму типу принадлежат газогидраты, встречающиеся вблизи побережья окраинных арктических морей и залегающие в толще многолетнемерзлых пород, затопленных в результате голоценовой трансгрессии Мирового океана [11, 12]. Под влиянием речного стока на фоне общего потепления Арктики происходит деградация газогидратов много-

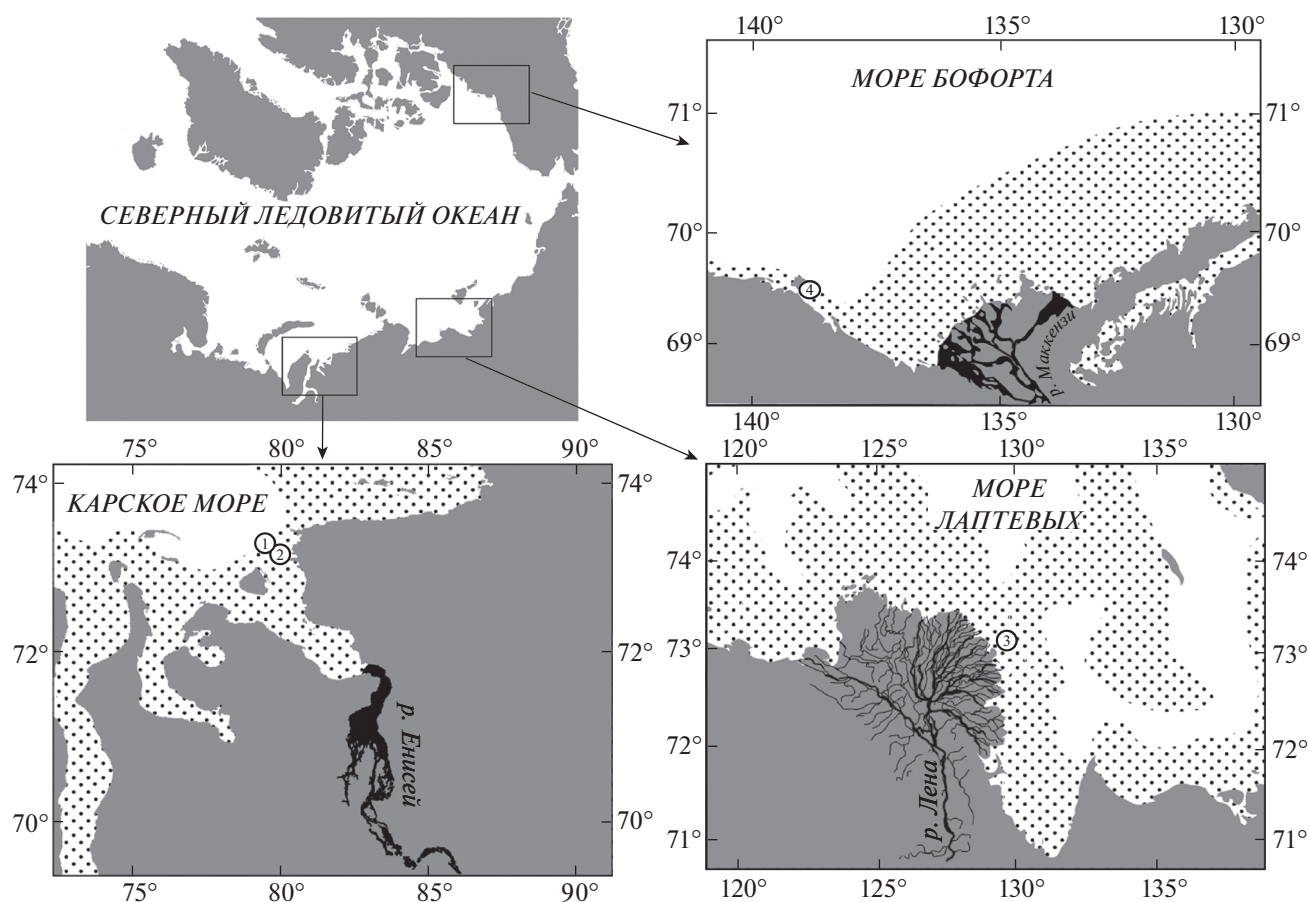


Рис. 1. Находки сибоглинид в приустьевых участках крупнейших рек Арктики. А – р. Енисей, Б – р. Лена, В – р. Маккензи. Цифрами обозначены виды сибоглинид: 1 – *Crispabrachia yenisey*, 2 – *Galathealinum karaense*, 3 – *Oligobrachia haakonmosbiensis*, 4 – *Galathealinum arcticum*. Заточкованные области соответствуют распространению газогидратов криогенного типа (по [12, 13]).

летнемерзлых пород. Место находки *C. yenisey* и *G. karaense* находится в районе, где концентрация метана в поверхностном слое воды достигает 130 нМ, что является максимальным значением для южной части Карского моря [13].

В море Лаптевых с газогидратами многолетнемерзлых пород связана находка *Oligobrachia haakonmosbiensis* в приустьевом районе р. Лены (рис. 1). Поверхностная соленость в районе находки составляет менее 10‰, тогда как придонная соленость на глубине 25 м составляет 32‰ [14]. Дегградация газогидратов многолетнемерзлых пород под влиянием стока р. Лены обеспечивает мощный поток метана, концентрации которого в поверхностном слое воды достигают 1000 нМ [15].

Вид *Galathealinum arcticum* был найден в море Бофорта в приустьевом районе р. Маккензи на глубине 36 м (рис. 1) [16]. Поверхностная соленость в приустьевых районах р. Маккензи колеблется от 1 до 10‰, тогда как на глубине более 20 м соленость превышает 31‰ [17]. Дельта реки Маккензи и прилегающие районы шельфа моря Бофорта характеризуются крупными залежами газогидратов в толще многолетней мерзлоты [18]. В условиях глобального потепления в приустьевом районе р. Маккензи так же, как в других районах Арктики, происходит диссоциация газогидратов многолетнемерзлых пород и выход метана в толщу воды и в атмосферу [19].

Таким образом, сильная стратификация по солености, характерная для эстуариев крупнейших арктических рек [9, 14, 17], обеспечивает высокую соленость на глубинах 25–36 м, где были обнаружены сибоглиниды. Высокие концентрации метана, необходимые для метаболизма сибоглинид, возникают в результате диссоциации газогидратов многолетнемерзлых пород под влиянием речного стока в условиях потепления Арктики [13, 19].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова за помощь в организации экспедиционных работ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование поддержано грантом РФФИ 18-14-00141-П.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все процедуры, проводимые в исследованиях с участием животных, соответствовали этическим стандар-

там учреждения или принятой практике для таких исследований.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Информированное согласие было получено от всех участников исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hilario A., Capa M., Dahlgren T.G., Halanach K.M., Little C.T.S., Thornhill D.J., Verna C., Glover A.G. New Perspectives on the Ecology and Evolution of Siboglinid Tubeworms // PLoS One. 2011. V. 6. Issue 2. P. 1–13.
2. Aharon P., Fu B. Sulfur and oxygen isotopes of coeval sulfate–sulfide in pore fluids of cold seep sediments with sharp redox gradients // Chem. Geol. 2003. V. 195. P. 201–218.
3. Naganuma T., Elsaied H.E., Hoshii D., Kimura H. Bacterial endosymbioses of gutless tube-dwelling worms in nonhydrothermal vent habitats // Mar. Biotechnol. 2005. V. 7. P. 416–428.
4. Lösekann T., Robador A., Niemann H., Knittel K., Boettius A., Dubilier N. Endosymbioses between bacteria and deep-sea siboglinid tubeworms from an Arctic cold seep (Haakon Mosby Mud Volcano, Barents Sea) // Environmental Microbiology. 2008. V. 10. № 12. P. 3237–3254.
5. Карасева Н.П., Ганцевич М.М., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Старовойтов А.В., Смирнов Р.В., Малахов В.В. Сибоглиниды (Annelida, Siboglinidae) как возможные индикаторы углеводородов на примере Охотского моря // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 1. С. 127–130.
6. Иванов А.В. Погонофоры // Фауна СССР. Новая сер. № 75. М., Л.: Изд-во АН СССР. 1960. 271 с.
7. Southward E.C. A new species of Galathealinum (Pogonophora) from the Canadian arctic // Canadian Journal of Zoology. 1962. V. 40. P. 385–389.
8. Harms I.H., Hübner U., Backhaus J.O. et al. Salt intrusions in Siberian River estuaries: observations and model experiments in Ob and Yenisei // Proceedings in Marine Science. 2003. V. 6. P. 27–46.
9. Gebhardt A.C., Schoster F., Gaye-Haake B. et al. The turbidity maximum zone of the Yenisei River (Siberia) and its impact on organic and inorganic proxies // Estuarine, Coastal and Shelf Sci. 2005. V. 65. P. 61–73.
10. Долгополова Е.Н. Закономерности движения вод и наносов в устье реки эстуарно-дельтового типа на примере р. Енисей // Водные Ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 175–185.
11. Kvenvolden N.A. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // Chem. Geol. 1988. V. 71. P. 41–51.
12. Соловьёв В.А. Гинзбург Г.Д., Теленев Е.В., Михалюк Ю.Н. Криотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л. ПНО “Севморпуть”. 1987. 150 с.
13. Гинзбург Г.Д., Грамберг И.С., Соловьёв В.А. Геология субмаринных газовых гидратов // Советская геология. 1990. № 11. С. 12–19.

14. Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.Н. Великие сибирские реки как источники метана на арктическом шельфе // Доклады Академии наук. 2007. Т. 414. № 5. С. 683–685.
15. Костылева А.В., Полухин А.А., Степанова С.В. Особенности гидрохимической структуры зоны смешения вод реки Лены и моря Лаптевых в осенний период // Океанология. 2020. Т. 60. № 6. С. 843–850.
16. Анисимов О.А., Забойкина Ю.Г., Кокорев В.А., Юрганов Л.Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лёд и Снег. 2014. № 2 (126). С. 69–81.
17. Macdonald R.W., Yu Y. The Mackenzie Estuary of the Arctic Ocean. In: The Handbook of Environmental Chemistry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006. V. 5. P. 91–120.
18. Majorowicz J.A., Osadetz K.G. Gas hydrate distribution and volume in Canada // AAPG Bulletin. 2001. V. 85. № 7. P. 1211–1230.
19. Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. V. 119. № 12. e2119105119.

DISCOVERY OF SIBOGLINIDS (ANNELIDA, SIBOGLINIDAE) IN THE ESTUARIES OF THE LARGEST ARCTIC RIVERS ARE ASSOCIATED WITH PERMAFROST GAS HYDRATES

N. P. Karaseva^a, N. N. Rimskaya-Korsakova^a, V. N. Kokarev^b, M. I. Simakov^c, R. V. Smirnov^d,
M. M. Gantsevich^{a,#}, and Academician of the RAS V. V. Malakhov^a

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

^b Faculty of Biological Sciences and Aquaculture, Nord University, Bodø, Norway

^c Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russian Federation

^d Zoological Institute RAS, Saint-Petersburg, Russian Federation

[#]e-mail: mgantsevich@gmail.com

In the estuaries of the largest Arctic rivers, namely, the Yenisei, Lena and Mackenzie, marine worms of the family Siboglinidae have been found. Their metabolism is provided by symbiotic chemoautotrophic bacteria. The strong salinity stratification characteristic of the estuaries of the largest Arctic rivers ensures high salinity at depths of 25–36 m, where siboglinids were found. High concentrations of methane necessary for the metabolism of siboglinids arise because of dissociation of permafrost gas hydrates under the influence of river runoff in the conditions of Arctic warming

Keywords: Siboglinidae, estuaries, Yenisei, Lena, Mackenzie, gas hydrates, permafrost rocks, Arctic warming