

УДК 591.4.

НАХОДКИ ПОГОНОФОР (ANNELIDA: SIBOGLINIDAE) В КАРСКОМ МОРЕ, ПРИУРОЧЕННЫЕ К РАЙОНАМ ДИССОЦИАЦИИ ПРИДОННЫХ И КРИОГЕННЫХ ГАЗОГИДРАТОВ

© 2023 г. В. В. Малахов¹, Н. Н. Римская-Корсакова¹, А. А. Осадчиев², И. П. Семилетов³,
Н. П. Карасева¹, М. М. Ганцевич^{1, *}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ),
Москва 119234, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН,
Москва 117997, Россия

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток 690041, Россия

*e-mail: mgantsevich@gmail.com

Поступила в редакцию 14.09.2022 г.

После доработки 24.11.2022 г.

Принята к публикации 24.11.2022 г.

Описаны находки погонофор *Siboglinum* sp. и *Nereilinum* sp. на северо-западе Карского моря в желобе Святой Анны. Предыдущие находки погонофор (*Crispabrachia yenisey* и *Galathealinum karaense*) в Карском море были сделаны в его южной части, в эстуарии р. Енисей. Два района находок погонофор в Карском море совпадают с областями распространения двух типов газогидратов — донных океанических и связанных с вечно-мерзлотными толщами. Залежи газогидратов в толще вечной мерзлоты приурочены к прибрежным районам Карского моря. В районах диссоциации газогидратов под влиянием стока рек формируется поток метана, необходимый для обеспечения жизнедеятельности погонофор. Обитание погонофор в желобе Святой Анны свидетельствует о наличии потока метана, который может быть связан с поступлением атлантической воды, вызывающей диссоциацию донных газогидратов. Указано на возможную роль потепления Арктики в обоих процессах.

Ключевые слова: погонофоры, газогидраты, вечная мерзлота, Карское море, желоб Святой Анны, потепление Арктики, Siboglinidae

DOI: 10.31857/S0134347523020055, **EDN:** DVRNNM

Сибоглиниды (Siboglinidae) — семейство седентарных кольчатых червей, все представители которого лишены пищеварительного тракта. Жизнедеятельность сибоглинид обеспечивается симбиотическими бактериями. В пределах Siboglinidae выделяют 4 группы организмов, различающихся по местам обитания и типу симбиотических бактерий (Hilario et al., 2011). Симбионты сибоглинид рода *Osedax* — гетеротрофные бактерии, которые получают энергию за счет расщепления липидов, содержащихся в костях китообразных и крупных рыб (Goffredi et al., 2007). Вестиментиферы (Vestimentifera) имеют сульфидокисляющих симбионтов (Cavanaugh et al., 1981; Felbeck, 1981). У Monilifera присутствуют метанокисляющие или сульфидокисляющие симбионты (Xu et al., 2022). У видов группы Frenulata (Pogonophora sensu stricto) известны как метанокисляющие, так и сульфидокисляющие симбионты (Southward et al., 1986; Schmaljohann, Flügel, 1987). Следует отметить, что

свободноживущие прокариоты обеспечивают окисление метана с использованием сульфатов в толще осадка в восстановительных условиях, в результате чего создаются высокие концентрации сероводорода, который служит источником энергии для сульфид-окисляющих симбионтов (Aharon, Fu, 2000, 2003; Voetius et al., 2000; Hu et al., 2015). Вот почему сибоглиниды с хемоавтотрофными симбионтами (кроме вестиментифер гидротермальных очагов), как правило, связаны с районами углеводородных просачиваний в Мировом океане независимо от того, содержат они метанокисляющие или сульфидокисляющие бактерии.

Карское море долгое время оставалось водоемом, в котором находки погонофор не были известны. Лишь в 2020 г. в Енисейском заливе Карского моря найдены два вида погонофор, причем оба оказались новыми для науки (Smirnov et al., 2020; Karaseva et al., 2021). Последние находки погонофор в Карском море дают возможность про-

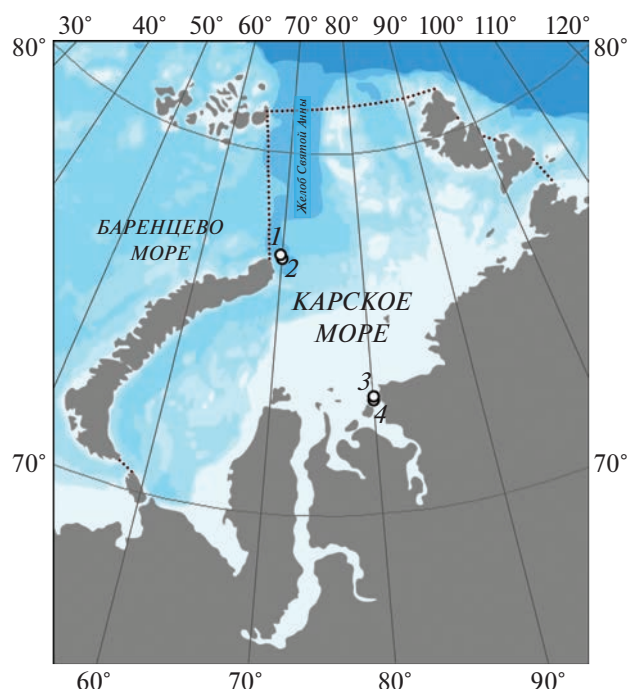


Рис. 1. Находки погонофоров в Карском море: 1, 2 — в желобе Святой Анны; 3, 4 — в Енисейском заливе. Пунктиром показаны географические границы Карского моря.

анализировать приуроченность сибоглинид к районам газогидратных залежей различного генезиса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В ходе гидробиологических работ 86-го рейса научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” (2021 г.) сибоглиниды обнаружены на двух станциях в северо-западной части Карского моря к северу от мыса Желания в желобе Святой Анны (рис. 1). Координаты станций, глубины и дата сбора приведены в табл. 1. Данные по температуре и солености получены с помощью термосалинографа SBE 21 SEACAT (Sea-Bird Electronics, Inc.). Методика обработки данных по глубине, температуре и солености в ходе 86-го рейса научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” изложена в специальной работе (Osadchiev et al., 2022). Пробы донных осадков отбирали с помощью дночерпателя

“Океан” с площадью раскрытия 0.25 м². После поднятия дночерпателя на палубу, пробы осадков промывали через сито с размером ячеек 0.15 мм. Разбор проб выполняли с применением биноклярных микроскопов Микмед (Россия), Olympus SZX (Япония). Фотографировали живые организмы с помощью окулярной насадки LabCam (iDuOptics, США) для iPhone6S (Apple, США). Материал фиксировали в 96%-ном этаноле. На станции 7249 на глубине 550.5 м обнаружены 3 трубки сибоглинид, в двух из которых найдены живые черви. На станции 7250 на глубине 437 м обнаружены 2 пустые трубки сибоглинид. В настоящее время не представляется возможным провести надежную видовую идентификацию найденных червей из-за недостаточности материала, поэтому мы ограничиваемся определением родовой принадлежности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Найденные экземпляры принадлежат к двум видам, относящимся к родам *Siboglinum* и *Nereilinum*.

Siboglinum sp. Единственный экземпляр найден в пробе, взятой на станции 7249. Трубка длиной 18 см и диаметром около 0.2 мм полупрозрачная, белесо-желтого цвета, лишена кольчатости по всей длине (рис. 2, *tu*). В трубке находится фрагмент червя длиной 6 см. Головная лопасть коническая (рис. 2, *cl*). Имеется единственное щупальце (рис. 2, *te*). Позади уздечки отчетливо виден белый железистый поясик (рис. 2, *gp*). Метамерная часть преаннулярного отдела туловища несет два ряда дорсальных папилл (рис. 2, *pa*). По особенностям морфологии найденный экземпляр отличается от большинства известных видов рода *Siboglinum* строением трубки, полностью лишенной кольчатости.

Nereilinum sp. Материал включает две трубки в пробе, взятой на станции 7249, и две трубки в пробе со станции 7250. Трубки длиной до 17 см, диаметром 0.15–0.2 мм. Трубки с явственной кольчатостью (рис. 3, *tu*). В одной из трубок из пробы со станции 7249 обнаружен фрагмент червя длиной 5 см. Головная лопасть короткая, остроконическая (рис. 3, *cl*). Имеются два щупальца (рис. 3, *te*). Перед уздечкой расположена борозда, соприкасающаяся с ней на вентральной стороне. Уздечка явственная; ниже уздечки на дорсальной

Таблица 1. Станции, на которых были обнаружены погонофоры в желобе Святой Анны

№ станции	Северная широта	Восточная долгота	Глубина, м	Температура, °C	Соленость, ‰	Дата сбора
7249	77.0001	70.0021	535.50	−0.9402	34.8310	22.10.2021
7250	77.4999	68.9953	428.96	−1.0171	34.8299	22.10.2021

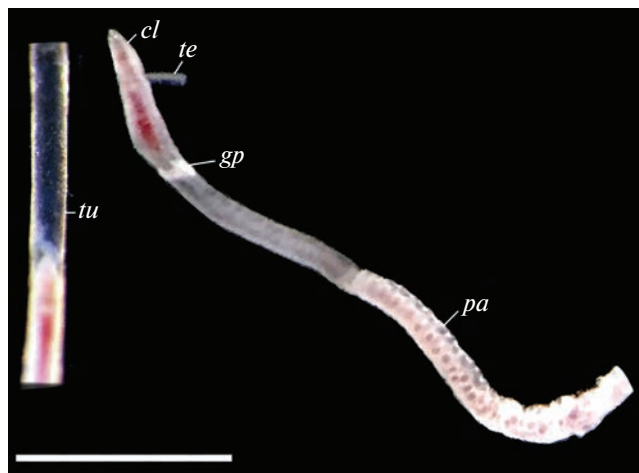


Рис. 2. Погонофора *Siboglinum* sp. из желоба Святой Анны. Обозначения: *cl* — головная лопасть, *gp* — железистые пятна, *pa* — папиллы, *te* — щупальце, *tu* — трубка. Масштаб: 1 мм.

стороне имеется железистый пояс, разделенный с вентральной стороны (рис. 3, *br*, *gp*). На спинной стороне метамерного отдела туловища на слабо обособленных папиллах с каждой стороны дорсального желобка расположены отверстия тубипарных желез (рис. 3, *pa*). В трубке обнаружены две личинки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сибоглиниды обнаружены пока только в двух районах Карского моря. Один из них — это район Енисейского залива в южной части моря (Римская-Корсакова и др., 2020; Smirnov et al., 2020; Karaseva et al., 2021). Находка сибоглинид в этом районе — между о-вом Сибирикова и западным берегом п-ва Таймыр — представляет интерес в нескольких аспектах. Подавляющее большинство видов семейства Siboglinidae — глубоководные организмы, но в Енисейском заливе обе находки сделаны на рекордно малых для сибоглинид глубинах. *Crispabrachia yenisey* обнаружена на глубине 28 м (Римская-Корсакова и др., 2020; Karaseva et al., 2021), тогда как *Galathealinum karaense* — на глубине 25 м (Smirnov et al., 2020). Такие небольшие глубины не характерны для сибоглинид. Сибоглиниды — стеногалинные организмы, они не встречаются в эстуариях и опресненных районах Мирового океана (Иванов, 1960). Для Енисейского залива характерна сильная вертикальная стратификация вод по солености (Долгополова, 2015; Harms et al., 2003; Gebhardt et al., 2005). Поверхностная средняя многолетняя соленость между о-вом Сибирикова и западным берегом п-ва Таймыр (как раз в районе находок *C. yenisey* и *G. karaense*) составляет менее 5‰ (Harms et al., 2003). В то же время, несмотря на

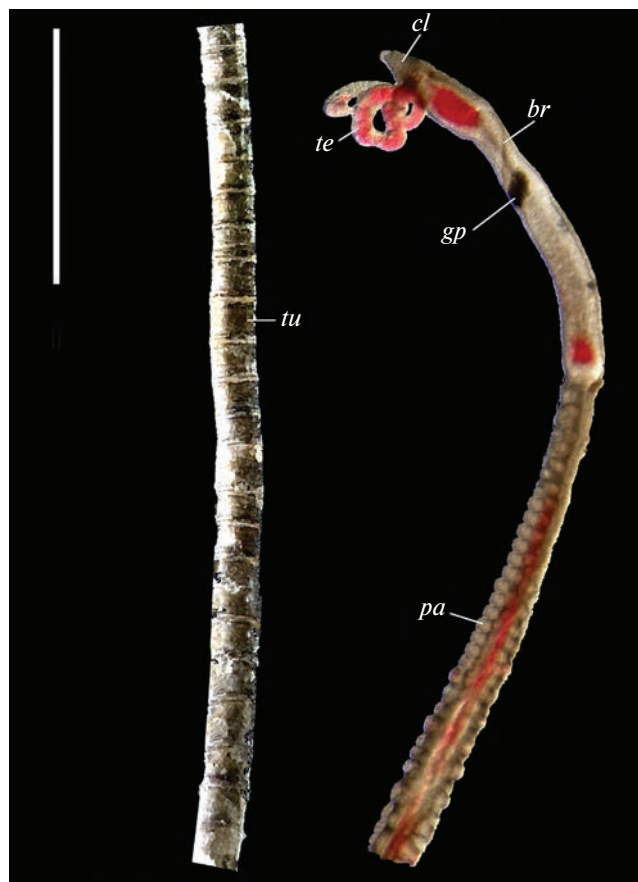


Рис. 3. Погонофора *Nereilinum* sp. из желоба Святой Анны. Обозначения: *br* — уздечка, остальные обозначения как на рис. 2. Масштаб: 1 мм.

сильное распреснение поверхностных вод, уже на глубине 10 м средняя многолетняя соленость приближается к 30‰ (Долгополова, 2015; Gebhardt et al., 2005).. Придонная соленость в этом районе составляет от 30 до 32.5‰ (Harms et al., 2003). Таким образом, хотя чисто географически район находок *C. yenisey* и *G. karaense* относится к зоне эстуария р. Енисей, на самом деле погонофоры здесь обитают при солености, близкой к океанической. 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 (Шахова и др., 2007). Высокие концентрации метана в данном случае возникают как результат деградации газогидратов вечной мерзлоты под влиянием речного стока (Шахова и др., 2007; Collet, Dallimore, 2003; Guo et al., 2004). Этот процесс интенсивно протекает на фоне общего потепления Арктики в эстуариях Оби, Енисея, Лены и других крупных рек российской Арктики и обеспечивает не только высокие концентрации метана в воде, но и выход этого парникового газа из воды в атмосферу (Сергиенко и др.,

2012; Анисимов и др., 2014; Shakhova et al., 2005, 2010; Ruppel, Kessler, 2017).

Интересно, что в канадской Арктике сходные условия имеются в дельте реки Маккензи, колоссальный сток которой вызывает сильнейшее опреснение поверхностных слоев воды моря Бофорта (Macdonald, Yu, 2006). Так же, как в Енисейском заливе, в приустьевых районах р. Маккензи отмечена сильная соленостная стратификация: если в поверхностном слое соленость колеблется от 1 до 10‰, то на глубине 20 м соленость во все сезоны года превышает 31‰ (Macdonald, Yu, 2006). Близкий к *G. karaense* вид погонофор *Galathealinum arcticum* Southward, 1962 был найден в приустьевом районе р. Маккензи на глубине 36 м (Southward, 1962). В то же время дельта р. Маккензи и прилегающие районы шельфа моря Бофорта характеризуются крупными залежами газогидратов в толще вечной мерзлоты, диссоциация которых под влиянием речного стока в условиях потепления Арктики порождает мощные потоки метана (Bily, Dick, 1974; Majorowicz, Hannigan, 2000; Osadetz et al., 2005; Bellefleur et al., 2007; Osadetz, Chen, 2010).

Моря российской Арктики рассматриваются как регион с огромными ресурсами углеводородов, которые превосходят потенциальные запасы всех других арктических стран (Gautier et al., 2009; Spencer et al., 2011; Max et al., 2013; Dmitrieva, Romanova, 2020). При этом Карское море превосходит другие моря российской Арктики по ресурсам углеводородов (Bird et al., 2008; Каминский и др., 2020). Известно, что основные запасы углеводородов в Мировом океане сосредоточены в виде газогидратов метана (Трофимук и др., 1981; Черский и др., 1983; Гинзбург и др., 1984; Макагон, 2003; Panayev, 1987; Kvenvolden, 1988; Kvenvolden et al., 1993; Dillon, Max, 2003; Klauda, Sandler,

2005; Max et al., 2013; Gaidukova et al., 2022). Залежи газогидратов в российской Арктике подразделяются на два типа. Один из них — это донные газогидраты, встречающиеся на больших глубинах в разных районах Мирового океана, а другой — залежи газогидратов в толще вечной мерзлоты, которые характерны для окраинных морей российской Арктики. Донные газогидраты занимают глубоководные районы Северного Ледовитого океана, тогда как залежи газогидратов в толще вечной мерзлоты находятся на небольших глубинах в относительной близости к российскому арктическому побережью (Черский и др., 1983; Соловьёв и др., 1987; Соловьёв, Гинзбург, 2003; Хименков и др., 2020; Dillon, Max, 2003; Romanovskii et al., 2005; Shakhova et al., 2005; Max et al., 2013). При этом области залежей донных и вечномерзлотных газогидратов в арктических морях разделены обширными зонами, где газогидраты отсутствуют либо из-за недостатка метана, либо из-за отсутствия термобарических условий, необходимых для формирования клатратов (Соловьёв и др., 1987; Соловьёв, Гинзбург, 2003; Хименков и др., 2020; Romanovskii et al., 2005; Shakhova et al., 2010).

Находка погонофор *Siboglinum* sp. и *Nereilinum* sp. в желобе Святой Анны на глубине более 400 м при солености более 34‰ вполне типична для большинства погонофор. Район находки соответствует самому южному участку распространения газогидратов в желобе Святой Анны (Соловьёв и др., 1987; Соловьёв, Гинзбург, 2003; Хименков и др., 2020). Известно, что потепление климата Арктики приводит к диссоциации газогидратов не только в прибрежной зоне, но и в глубоководных впадинах (Reagan et al., 2011; Max et al., 2013; Giustiniani et al., 2013). Согласно результатам моделирования, почти полная диссоциация газогидратов в районе желоба Святой Анны возможна при повышении температуры воды всего на 2 градуса (Giustiniani et al., 2013, fig.5). Теплая и соленая атлантическая вода поступает через прол. Фрама в центральную впадину Северного Ледовитого океана и далее вдоль желоба Святой Анны проникает в Карское море (Schauer et al., 2002; Lien et al., 2013; Dmitrenko et al., 2015; Osadchiv et al., 2022). Существующие модели (Giustiniani et al., 2013) предсказывают диссоциацию донных газогидратов в этом районе, и образующийся поток метана служит источником, обеспечивающим жизнедеятельность симбионтов, обитающих в желобе Святой Анны.

Те два района, в которых в Карском море найдены погонофоры, — это как раз области распространения двух основных форм газогидратов, известных в Арктике (рис. 4). Фауна симбионтов арктических морей исследована очень слабо, однако можно предположить, что в ней могут существовать две группы видов погонофор, одна из которых обитает на небольших глубинах и связа-

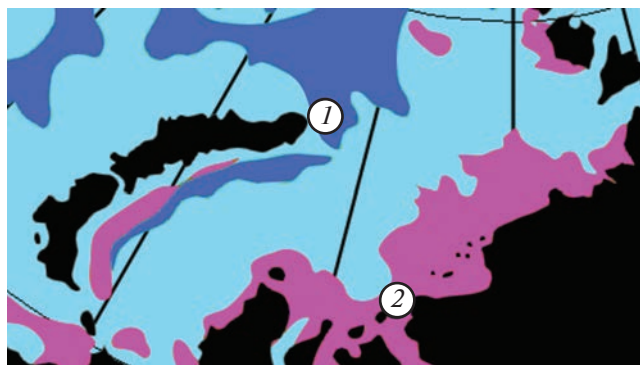


Рис. 4. Распространение газогидратов (по: Гинзбург, Соловьёв, 2003) и находки погонофор в Карском море: 1 — место обнаружения погонофор в желобе Святой Анны; 2 — в Енисейском заливе. Розовым цветом показана область залежей газогидратов в толще вечной мерзлоты на шельфе, синим — область донных газогидратов.

на с газогидратами в толще вечной мерзлоты в приустьевых районах крупных рек и прилежащих участках шельфа, а другая — на типичных для погонофор батимальных и абиссальных глубинах и связана с районами диссоциации донных газогидратов. Разумеется, эту гипотезу следует рассматривать как сугубо предварительную, которую необходимо проверить в дальнейших исследованиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 18-14-00141П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Гинзбург Г.Д., Иванов В.Л., Соловьёв В.А. Гидраты природного газа в недрах Мирового океана. В кн.: Нефтегазоносность Мирового океана. Л. 1984. С. 141–158.
- 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.
- Иванов А.В. Погонофоры // Фауна СССР. Новая сер. № 75. М., Л.: Изд-во АН СССР. 1960. 271 с.
- Каминский В.Д., Черных А.А., Медведева Т.Ю. и др. Карское море — перспективный полигон для изучения и освоения углеводородных ресурсов // NefteGaz.RU. Offshore. 2020. № 5(101). С. 82–89.
- Макагон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Рос. хим. журн. 2003. Т. 47. № 3. С. 70–79.
- Римская-Корсакова Н.Н., Карасева Н.П., Кокорев В.Н. и др. Первая находка погонофор (Annelida, Siboglinidae) в Карском море совпадает с районом высокой концентрации метана // Докл. Российской академии наук. 2020. Т. 490. С. 101–104.
- Сергиенко В.И., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Академии наук. 2012. Т. 445. № 3. С. 330–335.
- Соловьёв В.А., Гинзбург Г.Д. Арктические моря России. Условия газогидратоносности и потенциально газогидратоносные акватории // Геология и полезные ископаемые шельфов России. Атлас. М.: Научный мир. 2003. Лист 1–31, 1–32.
- 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.
- Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Толкачев М.В. Газогидратные залежи — новый резерв энергетических ресурсов // Геология нефти и газа. 1981. № 10. С. 15–22.
- Хименков А.Н., Кошурников А.В., Станиловская Ю.В. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. 2020. № 2. С. 65–105.
- Черский Н.В., Царев В.П., Никитин С.П. Исследование и прогнозирование условий накопления ресурсов газа в газогидратных залежах. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР. 1983. 156 с.
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.Н. Великие сибирские реки как источники метана на арктическом шельфе // Докл. Академии наук. 2007. Т. 414. № 5. С. 683–685.
- Aharon P., Fu B. Microbial sulfate reduction rates and sulfur and oxygen isotope fractionations at oil and gas seeps in deepwater Gulf of Mexico // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2000. V. 64. № 2. P. 233–246.
- 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.
- Bellefleur G., Riedel M., Brent T. et al. Implication of seismic attenuation for gas hydrate resource characterization, Mallik, Mackenzie Delta, Canada // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. B10311. <https://doi.org/10.1029/2007JB004976>
- Bily C., Dick J.W.L. Naturally occurring gas hydrates in the Mackenzie delta, N.W.T.1 // Bull. Can. Petrol. Geol. 1974. V. 22. № 3. P. 340–352.
- Bird K.J., Charpentier R.R., Gautier D. et al. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle // U.S. Geological Survey Fact Sheet. 2008. P. 2008–3049.
- Boetius A., Ravensschlag K., Schubert C. et al. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane // Nature. 2000. V. 407. P. 623–626.
- Cavanaugh C.M., Gardiner S.L., Jones M.L. et al. Prokaryotic cells in the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila* Jones: Possible Chemoautotrophic symbionts // Science. 1981. V. 213. P. 340–342.
- Collet T.S., Dallimore S.R. Permafrost Associated Gas Hydrate, Natural Gas Hydrate // Oceanic and Permafrost Environments. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 2003. P. 43–58.
- Dillon W.P., Max M.D. Oceanic Gas Hydrate, Natural Gas Hydrate // Oceanic and Permafrost Environments. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 2003. P. 59–74.

- Dmitrenko I.A., Rudels B., Kirillov S.A. et al.* Atlantic water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. P. 5158–5178.
<https://doi.org/10.1002/2015JC010804>
- Dmitrieva D., Romasheva N.* Sustainable Development of Oil and Gas Potential of the Arctic and Its Shelf Zone: The Role of Innovations // *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. V. 8. 1003.
<https://doi.org/10.3390/jmse8121003>
- Felbeck H.* Chemoautotrophic potential of the hydrothermal vent tube worm, *Riftia pachyptila* Jones (Vestimentifera) // *Science*. 1981. V. 213. P. 336–338.
- Gaidukova O., Misyura S., Strizhak P.* Key Areas of Gas Hydrates Study: Review // *Energies*. 2022. V. 15. 1799.
<https://doi.org/10.3390/en15051799>
- Gautier D.L., Bird K.J., Charpentier R.R. et al.* Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic // *Science*. 2009. V. 324. P. 1175–1179.
- 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.
- Giustiniani M., Tinivella U., Jakobsson M., Rebesco M.* Arctic Ocean Gas Hydrate Stability in a Changing Climate // *J. Geol. Res.* 2013.
<https://doi.org/10.1155/2013/783969>
- Goffredi S.K., Johnson S.B., Vrijenhoek R.C.* Genetic diversity and potential function of microbial symbionts associated with newly discovered species of *Osedax polychaete* Worms // *Appl. Environ. Microbiol.* 2007. V. 73. P. 2314–2323.
- Guo L., Semiletov I., Gustafsson Ö. et al.* Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial organic carbon export // *Global Biogeochem. Cycl.* 2004. V. 18. GB1036.
<https://doi.org/10.1029/2003GB002087>
- Harms I.H., Hübner U., Backhaus J.O. et al.* Salt intrusions in Siberian river estuaries: observations and model experiments in Ob and Yenisei // *Proc. Mar. Sci.* 2003. V. 6. P. 27–46.
- Hilario A., Capa M., Dahlgren T.G. et al.* New perspectives on the ecology and evolution of siboglinid tubeworms // *PLoS One*. 2011. V. 6. P. 1–14.
- Hu Y., Feng D., Liang Q. et al.* Impact of anaerobic oxidation of methane on the geochemical cycle of redox-sensitive elements at cold-seep sites of the northern South China Sea // *Deep-Sea Res. Part II. Top. Stud. Oceanogr.* 2015. V. 122. P. 84–94.
- Karaseva N.P., Rimskaya-Korsakova N.N., Ekimova I.A. et al.* A new genus of frenulates (Annelida: Siboglinidae) from shallow waters of the Yenisey River estuary, Kara Sea // *Invert. Syst.* 2021. V. 35. № 8. P. 857–875.
<https://doi.org/10.1071/IS20075>
- Klauda J.B., Sandler S.I.* Global Distribution of Methane Hydrate in Ocean Sediment // *Energy & Fuels*. 2005. V. 19. P. 459–470.
- Kvenvolden K.A.* Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // *Chem. Geol.* 1988. V. 71. P. 41–51.
- Kvenvolden K.A., Ginsburg G.D., Soloviev V.A.* Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates // *Geo-Marine Letters*. 1993. V. 13. P. 32–40.
- Lien V.S., Trofimov A.G.* Formation of Barents Sea Branch Water in the north-eastern Barents Sea // *Polar Res.* 2013. V. 32. 18905.
<https://doi.org/10.3402/polar.v32i0.18905>
- Macdonald R.W., Yu Y.* The Mackenzie Estuary of the Arctic Ocean // *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2006. V. 5. P. 91–120.
- Majorowicz J.A., Hannigan P.K.* Natural Gas Hydrates in the Offshore Beaufort–Mackenzie Basin—Study of a Feasible Energy Source II // *Natl. Resources Res.* 2000. V. 9. № 3. P. 201–214.
- Max M.D., Johnson A.H., Dillon W.P.* Natural Gas Hydrate – Arctic Ocean Deepwater Resource Potential // *SpringerBriefs in Energy*. 2013. P. 1–113.
- Osadchiv A., Viting K., Frey D. et al.* Structure and Circulation of Atlantic Water Masses in the St. Anna Trough in the Kara Sea // *Frontiers in Marine Sci.* 2022. V. 9.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.915674>
- Osadetz K.G., Morrell G.R., Dixon J. et al.* Beaufort Sea–Mackenzie Delta basin: a review of conventional and nonconventional (gas hydrate) petroleum reserves and undiscovered resources // *Geol. Survey of Canada*. 2005. bull. 585. P. 1–19.
- Osadetz K.G., Chen Z.* A re-evaluation of Beaufort Sea–Mackenzie Delta basin gas hydrate resource potential: petroleum system approaches to non-conventional gas resource appraisal and geologically-sourced methane flux // *Bull. Canad. Petrol. Geol.* 2010. V. 58. № 1. P. 56–71.
- Panayev A.* Gas hydrates in the oceans // *Int. Geol. Rev.* 1987. V. 29. P. 569–602.
- Reagan M.T., Moridis G.J., Elliott S.M., Maltrud M.* Contribution of oceanic gas hydrate dissociation to the formation of Arctic Ocean methane plumes // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C09014.
<https://doi.org/10.1029/2011JC007189>
- Romanovskii N.N., Eliseeva A.A., Gavrilov A.V. et al.* The long-term dynamics of the permafrost and gas hydrate stability zone on rifts of the east Siberian arctic shelf (Report 1) // *Earth's Cryosphere*. 2005. V. 9. № 4. P. 42–53.
- Ruppel C.D., Kessler J.D.* The interaction of climate change and methane hydrates // *Rev. Geophys.* 2017. V. 55. P. 126–168.
- Schauer U., Loeng H., Rudels B. et al.* Atlantic Water Flow Through the Barents and Kara Seas // *Deep-Sea Res. Part I*. 2002. V. 49. P. 2281–2298.
- Schmaljohann R., Flügel H.J.* Methane-oxidizing bacteria in Pogonophora // *Sarsia* 1987. V. 72. P. 91–98.
- Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G.* The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // *Geophysical Res. Lett.* 2005. V. 32. L09601.
<https://doi.org/10.1029/2005GL022751>
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East

- Siberian Arctic Shelf // J. Geoph. Res. 2010. V. 115. C08007.
<https://doi.org/10.1029/2009JC005602>
- Smirnov R.V., Zaitseva O.V., Vedenin A.A. A remarkable pogonophoran from a desalted shallow near the mouth of the Yenisey River in the Kara Sea, with the description of a new species of the genus *Galathealinum* (Annelida: Pogonophora: Frenulata) // Zoosystematica Rossica. 2020. V. 29. P. 138–154.
- Southward E.C. A new species of *Galathealinum* (Pogonophora) from the Canadian arctic // Canadian J. Zool. 1962. V. 40. P. 385–389.
- Southward A.J., Southward E.C., Dando P.R. et al. Chemoautotrophic function of bacterial symbionts in small Pogonophora // J. Mar. Biol. Ass. U.K. 1986. V. 66. P. 415–437.
- Spencer A.M., Embry A.F., Gautier D.L. et al. Chapter 1, An Overview of the Petroleum Geology of the Arctic, Geological Society. London: Memoirs. 2011. V. 35. P. 1–15.
- Xu T., Sun Y., Wang Z. et al. The Morphology, Mitogenome, Phylogenetic Position, and Symbiotic Bacteria of a New Species of *Sclerolinum* (Annelida: Siboglinidae) in the South China Sea // Front. Mar. Sci. 2022. V. 8.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.793645>

Findings of Pogonophores (Annelida: Siboglinidae) in the Kara Sea Associated with the Regions of Dissociation of Seafloor and Cryogenic Gas Hydrates

V. V. Malakhov^a, N. N. Rimskaya-Korsakova^a, A. A. Osadchiev^b, I. P. Semiletov^c,
 N. P. Karaseva^a, and M. M. Gantsevich^a

^aLomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia

^bShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Russia

^cIl'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok 690041, Russia

The discovery of new occurrences of pogonophores *Siboglinum* sp. and *Nereilinum* sp. from the St. Anna Trough (northwestern portion of the Kara Sea) has been described in this paper. Previously, occurrences of pogonophores (*Crispabrachia yenisey* and *Galathealinum karaense*) were reported in the southern part of the Kara Sea, in the estuary of the Yenisei River. Two areas in the Kara Sea where pogonophores were found coincide with the regions of distribution of two types of gas hydrates: oceanic seafloor gas hydrates, and gas hydrates associated with permafrost. Gas hydrate deposits in the permafrost are confined to the coastal regions of the Kara Sea. A methane flux forms in areas of dissociation of gas hydrates under the influence of river runoff. This methane source is vital for the survival of pogonophores. The existence of pogonophores in the St. Anna Trough indicates the presence of a methane flux associated with the inflow of Atlantic water, which causes dissociation of seafloor gas hydrates. The possible role of Arctic warming is apparent in both processes.

Keywords: pogonophores, gas hydrates, permafrost, Kara Sea, St. Anna Trough, Arctic warming, Siboglinidae