А. С. Саввичев

МИКРОБИОЛОГИЯ, 2000, том 69, № 6, с. 819–830

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 579.68(268.45)

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В НАЧАЛЕ ЗИМНЕГО СЕЗОНА

© 2000 г. А. С. Саввичев*, И. И. Русанов*, Н. В. Пименов*, И. Н. Мицкевич*, И. Т. Байрамов*, А. Ю. Леин**, М. В. Иванов*

*Институт микробиологии РАН, Москва

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

Поступила в редакцию 12.05.2000 г.

Проведены исследования общего количества микроорганизмов и определены скорости микробных процессов круговорота углерода в снежном покрове, морском льду, водной толще и донных осадках северной части Баренцева моря в сентябре–октябре 1998 г. Исследования проводились на двух полигонах: разрезе ЗФИ–о. Виктория и на участке акватории материкового склона со сплошным ледовым покровом в районе 81°–82° с.ш. и 37°–39° в.д. В период проведения исследований ледовый покров был представлен как толстым однолетним (до 1.2 м) и многолетним (до 1.85 м), так и паковым льдом. Показано, что численность бактерий в ряду снежный покров–морской лед–вода составляет (12–14)–(50–110)–(10–240) × 10^3 кл/мл соответственно. Определены скорости темновой CO_2-ассимиляции, потребления глюкозы и бактериального окисления метана. Наиболее высокая активность микробных процессов была показана для образцов нижнего молодого слоя морского льда. Самая низкая активность всех процессов наблюдалась в талой воде снегового покрова. Установлена прямая зависимость между концентрацией $C_{орг}$, величиной биомассы бактерий и значениями $\delta^{13}C_{орг}$ во взвеси из талых вод снега и льда. Численность микроорганизмов и интенсивности микробных процессов в донных осадках станций материкового склона сопоставимы с активностями процессов в центральной части Баренцева и северной части Карского морей.

Ключевые слова: микробные процессы, численность микроорганизмов, круговорот углерода, метанокисление, сульфатредукция, Баренцево море.

Первые исследования микроорганизмов Баренцева моря принято связывать с именем Б.Л. Исаченко, впервые установившим повсеместное распространение бактерий в воде и донных осадках арктических морей [1]. Спустя два десятилетия в 1928–1931 гг. В.С. Буткевич [2] получил данные о численности бактерий в воде юго-восточной и юго-западной частей Баренцева моря, а также отметил повышенную плотность бактерий в зоне смешения теплого течения Гольфстрим и холодных арктических вод. В семидесятых годах проведены исследования по учету бактериопланктона в акватории Баренцева моря в разные сезоны [3]. В работах В.А. Байтаз с соавт., проводимых с 1983 по 1994 гг. в открытых районах Баренцева моря [4], определена численность бактериопланктона водной толщи на ряде разрезов, а также рассчитана общая биомасса бактерий.

При достаточно представительном массиве экспериментальных данных по численности, биомассе, размерам клеток бактериопланктона Баренцева моря остаются практически не исследованными скорости и закономерности протекания ключевых микробных процессов.

В ряду арктических морей Баренцево море относится к наиболее изученному. Однако необходимо принимать во внимание два обстоятельства: 1) основные данные по Баренцеву морю ограничиваются 80° северной широты, 2) практически все исследования проводились во время короткого летнего сезона. Это касается всех процессов, связанных как с поступлением вещества из атмосферы в водную толщу, так и процессов, обусловленных альго-бактериальной активностью.

Рассматривая Арктический бассейн с точки зрения протекания биогеохимических процессов, можно отметить ряд особенностей, отличающих его от большинства акваторий Мирового океана: 1) значительный поток атмосферного аэрозоля, вымываемого снежными массами из атмосферы [5] и концентрирующегося на поверхности ледового покрова, 2) наличие двух дополнительных фазовых барьеров: верхняя и нижняя границы ледового покрова, 3) ярко выраженная сезонность в протекании всех биологических процессов.

Очевидно, что все процессы, протекающие при участии микроорганизмов, тесно связаны со всеми перечисленными особенностями.

Морской лед генетически связан с водой, и его микрофлора в той или иной степени является производной от микрофлоры морской воды. Ряд исследователей отмечал, что основная масса бактерий встречается в нижних, наиболее молодых, слоях морского льда, в заполненных незамерзающим солевым рассолом каналах [6, 7], где развивается популяция ледовых водорослей, среди которых преобладают диатомовые. Выделяемые водорослями органические метаболиты стимулируют рост бактерий [8]. Гросси [9] была изучена альго–бактериальная ассоциация, сложившаяся в годичном льду в период цветения диатомовых водорослей, благодаря которой лед был окрашен в коричневый цвет. Численность бактерий в таком льду возрастала пропорционально увеличению численности диатомовых водорослей в освещенных участках льда. Около 30% бактериальной биомассы составляли эпифитные бактерии, связанные с водорослями. Эта группа бактерий отличалась более крупными клетками и более быстрым ростом численности популяции. В единичных работах показаны сезонные колебания численности бактерий в морском льду. Приводятся данные об увеличении количества бактерий в Арктике в период, когда численность популяции водорослей находится в статическом состоянии или снижается. При этом максимальную численность и биомассу бактерий (45.5 мг С/м^2) обнаруживали в конце сезона в фазе уменьшения биомассы водорослей [10].

Во время рейса "Polarstern" в 1986 г., в период антарктического лета, проводились детальные исследования бактериального сообщества паковых льдов. Распределение микроорганизмов оказалось крайне неравномерным и значительно варьировало в зависимости от класса льдов. Отмечалось, что в нижних, самых молодых, слоях льда, выявляется наибольшая численность бактерий [7].

Для установления особенностей микробных процессов круговорота углерода представляет также интерес изучение источников органического вещества (ОВ) во взвеси из снега, льда и водной толщи. В составе взвеси может присутствовать автохтонное органическое вещество (ОВ фитопланктона и бактериопланктона) и аллохтонное ОВ, принесенное с континента. В составе взвеси арктических морей присутствует много эолового материала в виде минеральных и органических компонентов. Среди последних преобладают обрывки растительных тканей, цветочная пыльца, диатомовые водоросли и др. В изотопном составе органического углерода ($C_{орг}$) этого материала больше легкого изотопа ^{12}C, чем в морском фитопланктоне средних широт. В арктических районах значения $\delta^{13}C_{орг}$ фитопланктона (взвеси) могут варьировать от –24 до –28‰ [11–13]. Органическое вещество взвеси является субстратом для развития бактериальных процессов. Исследование $\delta^{13}C_{орг}$ взвеси наряду с учетом биомассы бактерий и скорости микробных процессов может пролить свет на природу $C_{орг}$ взвеси.

Цель данной работы заключалась в определении общей численности и биомассы бактерий и количественной оценке роли микробных процессов в синтезе и трансформации органического вещества в снежном покрове, толще морского льда, водной толще и современных донных осадках в условиях начала зимнего сезона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы для исследований были получены в комплексной экспедиции "Арктика-98" на НЭС "Академик Федоров" в Баренцевом море в сентябре–октябре 1998 г.

Пробы донных осадков отбирали дночерпателем "Океан", грунтовым пробоотборником "Box-corer", ударной геологической трубкой УТ-73 и квадратным пробоотборником КП-0.1, пробы воды – стеклянным двухсотлитровым батометром и кассетой батометров зондирующего комплекса "Rozett". Образцы ила и воды отбирали немедленно после подъема проб на борт судна. Осадки помещали в пластиковые шприцы объемом 5 см^3 и закрывали пробкой из бутиловой резины. Образцы воды помещали с изливом, во избежание захвата кислорода воздуха, в стеклянные флаконы и закрывали резиновой газонепроницаемой пробкой.

Все эксперименты с осадками и водой проводили в первые часы после отбора проб, при температурах, близких к *in situ*, в интервале от –1.4 до 1.5°С.

Для проведения экспериментов по определению потенциальной удельной интенсивности различных микробных процессов в пробах снега и льда их переводили в состояние талой воды.

Отбор проб снега осуществляли с поверхности льда с наветренной части судна пластиковым ведром в полиэтиленовые пакеты большого объема. Для минимизации загрязнения с судна продуктами сгорания топлива, верхние 5 см снега отбирали отдельно. Плавление снега проводили при температуре 8–10°С непосредственно в пробоотборных пакетах, талую воду собирали в предварительно промытые емкости. Сразу после окончания таяния пробы воды для определения скоростей микробных процессов разливали в пенициллиновые флаконы объемом 25 мл и герметично, без доступа воздуха, закрывали резиновой пробкой.

Отбор кернов льда осуществляли с помощью ручного ледового бура (диаметр керна 180 мм) совместно со специализированным отрядом. Керны льда транспортировали в лабораторию в полиэтиленовых пакетах. Разделку кернов на горизонты (верх, середина и низ) производили в соот-

ветствии с результатами послойного измерения температуры внутри кернов. Плавление кернов проводили раздельно для каждого горизонта. Талую воду подвергали дальнейшей обработке аналогично снеговой воде. Инкубацию проб талой воды льда и снега проводили при температуре от –0.5 до –1.4°С в емкости с морской водой на палубе судна.

Для определения общей концентрации взвеси воду фильтровали через предварительно прокаленные и взвешенные (точность взвешивания составляет ±0.05 мг) стекловолокнистые фильтры GF/F диаметром 47 мм, затем фильтры высушивали при 60°С.

Содержание клеток микроорганизмов в пробах воды определяли методом прямого подсчета в люминесцентном микроскопе. Фиксированный объем (35–50 мл) водной пробы фильтровали через ядерный фильтры на лавсановой основе (производство России, Дубна) с диаметром пор 0.19 мкм, предварительно обработанные суданом черным. Осажденный на фильтре материал фиксировали 96%-ным этанолом и окрашивали флуоресцентными красителями, в качестве которых использовали акридиновый оранжевый и ДАФИ (DAPI)). После окраски и подсушивания фильтры заключали в нефлуоресцирующее иммерсионное масло и просматривали под люминесцентным микроскопом ЛЮМАМ-3 при увеличении ×900. Учет клеток проводили в 20 полях зрения.

Общее количество бактерий в 1 мл воды (N) рассчитывали по формуле:

$$N = n \times 10^6 \times S \times s^{-1} \times V^{-1},$$

где n – среднее число бактерий в поле зрения, S – площадь фильтрующей поверхности фильтра, мм^2, s – площадь просматриваемого поля зрения, мкм^2, V – объем профильтрованной воды, мл.

Интенсивность метанокисления определяли модифицированным радиоизотопным методом в экспериментах с краткосрочной инкубацией (12–36 ч) проб в присутствии $^{14}CH_4$, растворенного в стерильной дегазированной воде [14, 15]. В пробу воды или ила вносили туберкулиновым шприцем 0.2 мл раствора $^{14}CH_4$ общей активностью 1–2 мкКи. По окончании срока инкубации пробы фиксировали 2 М раствором КОН (1 мл) или раствором Люголя (1 мл). Далее, в лабораторных условиях, пробы подвергали дальнейшей обработке по модифицированной методике [15]. При этом учитывали как углекислоту, образовавшуюся в результате микробного окисления метана, так и углерод метана, перешедший в биомассу бактерий и внеклеточные органические экзометаболиты. Величину интенсивности микробного образования органических экзометаболитов определяли по разнице величин, полученных при "мокром сжигании" персульфатом калия (аммония) общего органического вещества и биомассы, осажденной на фильтрах.

Интенсивность бактериальной CO_2-ассимиляции определяли с использованием меченого по углероду [^{14}C]-бикарбоната натрия (10–20 мкКи на пробу), растворенного в стерильной морской воде. В пробы вводили по 0.1–0.2 мл меченого раствора и инкубировали в течение 12–36 ч при температурах, близких к *in situ*. По окончании инкубации в пробах определяли как количество углекислоты, включенной в биомассу бактерий, так и образование общего органического вещества методом сжигания персульфатом калия [16].

Интенсивность микробного потребления [^{14}C]-глюкозы (гетеротрофный потенциал) измеряли методом краткосрочной инкубации проб (12–24 ч) при температурах, близких к *in situ*, с добавлением 0.1–0.2 мкл (5–10 мкКи) меченого раствора в пробу. Далее определяли количество углерода глюкозы как окисленного до углекислоты, так и включенного в биомассу.

Интенсивности процесса сульфатредукции оценивали по образованию меченых сероводорода, пиритной, элементной и органической серы из $Na_2^{35}SO_4$ (0.1–0.2 мл, 25–50 мкКи на пробу) в экспериментах, аналогичных предыдущим [16].

Радиоактивность фиксированных образцов определяли на жидкостном сцинтилляционном счетчике RacBeta (LKB, Швеция). Расчет интенсивности микробных процессов проводили по ранее описанной формуле [15].

Для определения изотопного состава $C_{орг}$ образцы обрабатывали 8%-ной HCl при нагревании для удаления карбонатов. После этого пробу сжигали на вакуумной циркуляционной установке в кварцевой трубке при температуре 900°С. Образовавшиеся при этом CO_2 запаивали в ампулы. Содержание $C_{орг}$ взвеси определяли хроматографическим методом по количеству выделяющейся CO_2. Изотопный состав углерода измеряли на масс-спектрометре МИ-1201В, оснащенном трехканальной системой напуска газа (СНГ-3). Погрешность измерения ±0.5‰.

Для определения концентрации метана в образцах пробы воды и ила отбирали в пробирки Балч с фиксированным воздушным объемом. Содержание метана определяли по методике фазово-равновесной дегазации проб воды и ила на газовом хроматографе Хром-5 с пламенно-ионизационным детектором.

Краткая характеристика района работ

Исследования проводили на двух полигонах: разрезе Земля Франца Иосифа (ЗФИ)–о. Виктория и участок акватории материкового склона со сплошным ледовым покровом в районе 81°–82° N

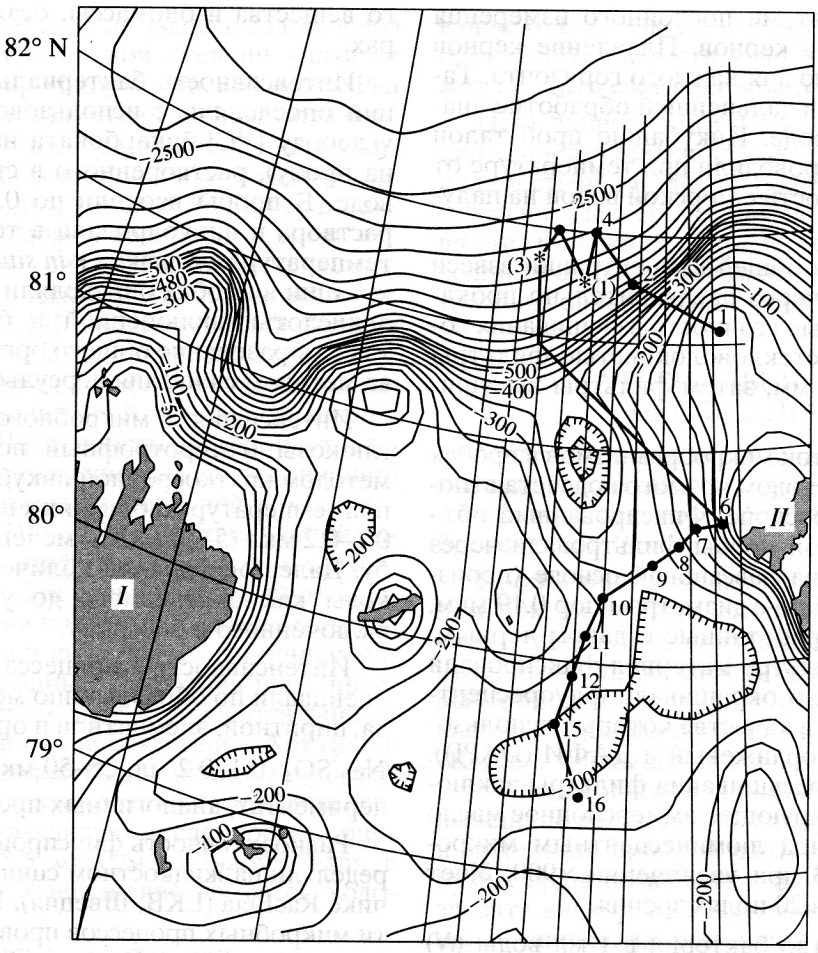

Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб образцов снега, льда, воды и донных осадков.
1–16 – номера станций отбора проб водной толщи и донных осадков; (1–3)* – номера станций снегового и ледового покрова (*I* – Шпицберген, *II* – Земля Франца Иосифа).

и 37°–39° E (рис. 1). Исследуемая акватория частично освобождается ото льда только на короткое время летнего сезона. В остальные сезоны характерен устойчивый сплошной ледяной покров. В период проведения исследований ледовый покров был представлен как толстым однолетним (до 1.2 м) и многолетним (до 1.85 м), так и паковым льдом. Снежный покров состоял из свежевыпавшего и переметенного снега глубиной не более 25 см непосредственно в местах отбора проб.

Гидрологические и гидрохимические условия водной толщи отличались значительной изменчивостью. Холодные арктические воды, смешиваясь с более теплыми атлантическими, регистрируемыми на глубинах 80–200 м, приводят к изменению плотности и значительной вертикальной стратификации. Соленость морской воды также неоднородна, что обусловлено концентрированием рассолов в процессе образования морского льда и погружением их внутрь водных масс. Температура воды была минимальной в подледном слое, достигая –1.7…–1.8°C, постепенно повышаясь до 1.8°C на глубинах 50–200 м и далее понижаясь в придонных горизонтах.

Отобранные колонки осадков содержали полужидкий пелитовый ил в поверхностном горизонте. От поверхности и до глубины 0.4–0.6 м осадки были окисленными, Eh = +100…+400 мВ. Ниже 0.5 м окислительно-восстановительный потенциал осадков был близок к нулю, в отдельных участках илов наблюдались слабо восстановленные условия. В нижележащих слоях встречался песок и мелкий гравий, прослои алеврита и примазки гидротроилита.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численность и биомасса бактерий

Численность и биомасса бактериопланктона на разрезе ЗФИ–о. Виктория была определена на семи станциях (ст. 6–15, табл. 1). Отбор проб и учет осуществлялся на 3–5 горизонтах. Получен-

Таблица 1. Микробиологические и биогеохимические параметры образцов водной толщи Баренцева моря

Номер станции, горизонт, м	Координаты	Alk, мг-экв/л	Общая численность бактерий, 10^3 кл/мл	Биомасса бактерий, мкг/л	Потребление глюкозы, мкг С/(л сут)	Ассимиляция CO_2, мкг С/(л сут)	CH_4, нл/л	Окисление CH_4, нл/(л сут)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ст. 1,	81°34′ N							
40	44°18′ E	2.6	110	23.1	8.1	25	130	0.3
130		2.6	130	27.3	7.2	23	140	0.08
245		2.6	90	19.9	55	33	150	0.2
Ст. 2,	81°47′ N							
5	40°46′ E	2.7	80	16.8		15	120	0.12
25		2.6	20	4.2		14	130	0.2
50		2.7	65	13.7	8.0	11	160	0.07
100		2.8	150	31.5	6.5	14	130	0.08
200		2.8	80	16.8	9.0	14	140	0.04
400		3.0	190	40	8.0	13	160	0.02
Ст. 4,	82°00′ N							
2	38°58′ E	2.6	16	3.7	22	22	130	0.02
20		2.6	44	9.2	16	27	160	0.04
120		2.5	70	14.7	44	13	180	0.02
500		2.9	10	2.1	55	22	110	0.07
придонный, 750		2.8			76	17	100	0.09
Ст. 5,	82°00′ N							
25	37°33′ E	2.6	17	3.6	60	18	150	0.01
40		2.5	13	2.7	14	10	150	0.08
100		2.8	50	11	27	19	160	0.3
придонный, 1050		2.9	80	16.8	9.3	10	170	0.01
Ст. 6,	80°38′ N							
25	44°26′ E	2.6	34	7.1	21	21	70	0.06
50		2.6	70	14.7	29	16	80	0.06
275		3.0	200	42	25	22	50	0.07
Ст. 8,	80°28′ N							
поверхностный	42°08′ E	2.6	20	4.2	49	20	80	0.08
15		2.5	10	2.1	9.0	18	80	0.09
100		2.6	15	3.2	49	21	90	0.07
придонный, 150		2.9	100	21	30	22	100	0.07
Ст. 9,	80°24′ N							
поверхностный	41°34′ E	2.6	20	4.2	8.0	22	90	0.02
20		2.5	20	4.2	7.0	19	100	0.28
50		2.6	30	6.3	14	16	100	0.14
170		2.9	10	2.1	15	6.8	90	0.08
придонный, 340		2.9	16	3.4	18	4.4	110	0.02
Ст. 10,	80°23′ N							
поверхностный	40°30′ E	2.6	105	22.1	46	12	100	0.01
25		2.6	95	20	17	22	110	0.02
90		2.6	120	25.2	15	26	120	0.2
180		2.9	80	16.8	27	21	120	0.16
придонный, 250		2.9			90	23	120	0.08

Таблица 1. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ст. 11,	80°19′ N							
поверхностный	39°59′ E	2.6	240	50.4	9.2	11	100	0.18
20		2.5	90	19	19	14	110	0.25
100		2.9	90	19	17	8.4	110	0.25
придонный, 250		2.8	105	22.1	35	18	120	0.16
Ст. 12,	80°17′ N							
поверхностный	39°21′ E	2.6	90	19	24	16	100	0.1
25		2.5	65	13.7	48	21	90	0.06
40		2.6	70	16	14	12	110	0.14
60		2.7	85	18	32	12	120	0.25
придонный		2.8	90	19	30.5	7.8	120	0.02
Ст. 15,	79°39′ N							
поверхностный	38°38′ E	2.6	10	2.1	9.6	16	100	0.15
60		2.7	13	2.7	30	15	130	0.23
100		2.8	90	19	16	15	130	0.13
180		2.9	10	2.1	14.3	20	150	0.1
придонный, 310		2.9	20	4.2	35.5	26	100	0.23

Таблица 2. Микробиологические и биогеохимические характеристики образцов снега и льда

Номер и координаты станции		Общая численность бактерий, 10^3 кл/мл	Биомасса бактерий, мкг/л	Содержание CH_4, нл/л	Окисление CH_4, нл/(л сут)	CO_2-ассимиляция, мкг С/(л сут)	Потребление глюкозы, мгк С/(л сут)
Ст. 1, 81°47′ N 40°46′ E	Снег-1	14	4.9	80	0.88	3	64.6
Ст. 2, 82°01′ N 39°05′ E	Снег-2	12	4.2			5	
Ст. 2, 82°01′ N 39°05′ E	Лед, керн № 7, верх – 60 см	80	28	80	0.18	13	67
	Лед, керн № 7, центр – 60 см	70	26	80	0.56	20	78
	Лед, керн № 7, низ – 60 см	110	39	80	2.52	45	115
Ст. 3, 82°00′ N	Лед – 3, верх – 85 см	50	18	80	0.79	8	207
37°33′ E	Лед – 3, низ – 85 см	100	36	80	1.1	30	108

ные данные сильно варьируют по станциям и глубинам. Максимальные величины численности на большинстве станций обнаружены в поверхностных и придонных пробах и лишь на станциях 10 и 15 обнаружены локальные увеличения численности на горизонтах 90 и 100 м, где, вероятно, проходит граница вод с разной температурой и соленостью.

В водных образцах северного полигона (ст. 1–5, табл. 1) численность бактерий варьировала от

Таблица 3. Биогеохимические характеристики взвеси и $\delta^{13}C_{орг}$ в образцах снега, морского льда и водной толщи

Номер станции, глубина, м	Концентрация взвеси, мг/л	Содержание $C_{орг}$ во взвеси, мкг С/л	$\delta^{13}C_{орг}$, ‰
Образцы снега			
Снег 1	2.6	49	–25.4
Снег 2	2.8	41	–24.7
Снег 3	4.3	55	–25.8
Образцы льда			
Лед 1 верх	9.0	220	–24.5
Лед 1 низ	4.5	290	–23.8
Лед 3 верх	4.0	189	–24.6
Лед 3 низ	3.4	310	–24.1
Образцы водной толщи			
Ст. 1, 130	1.45	66	–24.9
Ст. 2, 100	1.05	54	–23.2
Ст. 2, подледный	2.0	160	–22.6
Ст. 2, 400	0.90	35	–24.6
Ст. 5, 100	1.21	54	–24.7
Ст. 5, 1050	1.41	90	–21.9
Ст. 6, 25	1.40	60	–24.3
Ст. 6, 50	1.49	50	–24.3
Ст. 6, 275	1.53	50	–24.9
Ст. 8, 15	1.00	69	–23.2
Ст. 8, 100	1.02	57	–23.8
Ст. 8, 150	1.05	49	–23.4
Ст. 10, 25	1.09	77	–24.7
Ст. 10, 90	1.11	97	–25.3
Ст. 10, 250	1.28	71	–25.5
Ст. 12, поверхностный	1.03	109	–24.3
Ст. 12, придонный	1.13	97	–24.9
Ст. 15, поверхностный	1.69	60	–25.5
Ст. 15, 100	1.19	103	–25.6
Ст. 15, 310	1.20	81	–24.1

10000 до 190000 кл/мл. Локальные увеличения численности были обнаружены на 100 м на ст. 2 и на 120 м на ст. 4. На этих же глубинах наблюдалось повышение температуры и солености воды.

Полученные величины количества клеток бактерий оказались в несколько раз ниже тех, о которых сообщают Байтаз с соавт. [4]. Общая численность клеток в образцах поверхностных вод, отобранных ими в августе 1984 г., составила $(561 \pm 21) \times 10^3$ кл/мл, а биомасса – 112 ± 3.0 мг/м^3. Эти авторы работали в акватории Баренцева моря южнее 76°–78° N и сами отмечали снижение численности клеток при продвижении в северном направлении. По данным А.Е. Крисса бактериальная численность, выявленная методом прямой микроскопии, в районе Северного полюса не превышала 10 000 кл/мл [17], т.е. находилась на нижнем пределе величин, полученных нами.

Количество клеток бактерий было определено на трех станциях в образцах снегового покрова и морского льда (табл. 2). Данные учета численности бактерий в толще морского льда подтвердили известные представления о повышенной биологической активности нижнего слоя льда. В нем обнаружена максимальная плотность бактерий, составившая $(100–110) \times 10^3$ кл/мл. Помимо бактериальных клеток здесь были выявлены одноклеточные водоросли и жгутиковые, придающие этому слою характерную буроватую окраску. Численность диатомовых водорослей в этих образцах достигала $(0.2–3.0) \times 10^3$ кл/мл. Методом световой микроскопии было показано, что клет-

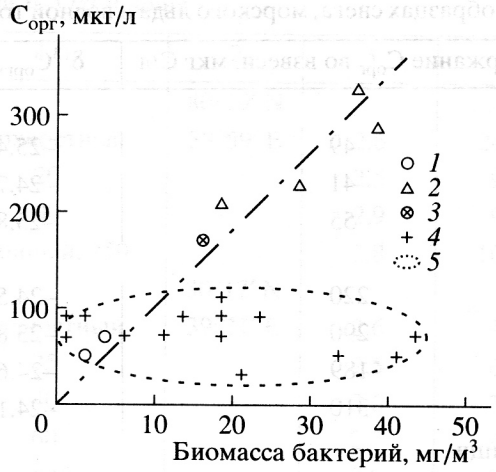

Рис. 2. Зависимость содержания $C_{орг}$ во взвеси талой воды из снега и льда от количества биомассы бактерий на полигоне 81°30′–82° N: *1* – снег, *2* – лед, *3* – водная толща подо льдом, *4* – водная толща, *5* – поле значений для взвеси из водной толщи южнее 81° N.

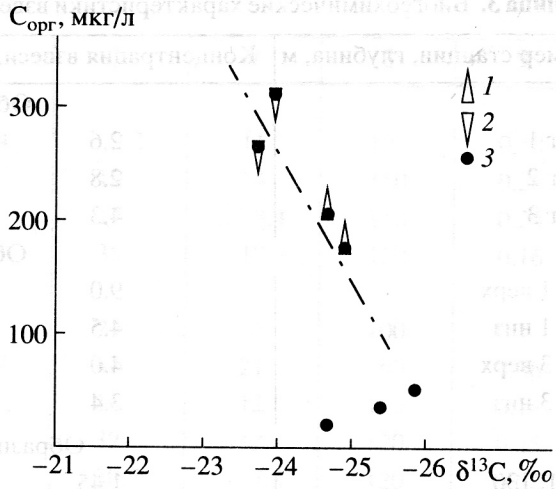

Рис. 3. Зависимость значений δ^{13}C-$C_{орг}$ от содержания $C_{орг}$ во взвеси талой воды из снега и льда на полигоне 81°30′–82° N: *1* – лед-верх, *2* – лед-низ, *3* – снег.

ки бактерий морского льда крупнее, чем в водных образцах и, соответственно, выше их биомасса. Напротив, в образцах снега численность бактерий была невелика (12000–14000 кл/мл). В просмотренных препаратах преобладали мелкие короткие палочки и кокки. При микроскопировании образцов талого снега было выявлено много минеральных и органических частиц, не имеющих свечения, свойственного живым клеткам. Отмеченные частицы относятся к эоловой взвеси, сорбированной снегом из атмосферы. Вероятно, бактерии, учитываемые в образцах снега, также являются компонентом эоловой взвеси.

Интенсивности процессов CO_2*-ассимиляции, потребления глюкозы и окисления метана*

Результаты измерений интенсивности темновой ассимиляции ^{14}C углекислоты дают представление об общей биогеохимической активности образцов. Проведенные исследования показали (табл. 1, 2), что наиболее низкие скорости CO_2-ассимиляции обнаружены в пробах талой воды снегового покрова (3–5 мкг С/(л сут)). Общая щелочность талой снеговой воды была низкой (Alk ≤ 0.2 мг-экв.). Скорость $^{14}CO_2$-ассимиляции в водных образцах варьировала от 10 до 33 мкг С/(л сут). Сходные величины $^{14}CO_2$-ассимиляции (11 мкг С/(л сут)) были получены в центральной части Баренцева моря в январе 1981 г. [18]. Наиболее высокие показатели общей биогеохимической активности выявлены нами в образцах талой воды, полученных из нижнего слоя льда (45 мкг С/(л сут)).

Потребление глюкозы в талой воде снегового покрова и морского льда варьировало от 65 до 207 мкг С/(л сут) (табл. 2). В образцах водной толщи интенсивность использования глюкозы находилась в интервале от 6.5 до 90 мкг С/(л сут), максимальная активность процесса была обнаружена в придонных горизонтах (ст. 4, 10, 11, 15).

Концентрация метана в исследуемых образцах изменялась от 50 до 180 нл/л. Интенсивности окисления метана на разных горизонтах исследуемых станций варьировали от 0.01 до 0.3 нл/(л сут). Локальные повышения активности процесса метанокисления выявлены на горизонтах 100–200 м, для ряда станций совпадая с горизонтами повышенной активности CO_2-ассимиляции. Для сравнения, интенсивность окисления метана в воде северной части Карского моря составляла 0.4–8.8 нл CH_4/(л сут), а в прибрежной акватории в районе острова Диксон достигала 8.9–26.1 нл CH_4/(л сут) [19].

Анализируя полученные данные необходимо отметить, что реальные процессы жизнедеятельности бактерий и водорослей протекают в толще льда только в жидкой фазе в межкристаллическом пространстве [20]. Содержание солей в таких ячейках обычно превышает их содержание в морской воде. Известно, что соотношение жидкой (рассолы) и твердой фаз в морском льду зависит от возраста льда и его температуры. Так, при –2°С – температуре, наблюдающейся в самом нижнем пограничном с водой слое, на долю жидкой фазы приходится 0.7 объема льда, при –4°С – 0.35, а при –8°С – около 0.1 [21]. При таянии образцов происходит смешивание жидкой воды (рассола) из межкристаллических ячеек, в которых растворены минеральные и органические компоненты и протекают все биогенные процессы, с ультрапресной водой кристаллов льда. В результате этого, полученные значения численности микроорганизмов и активности всех процессов оказы-

ваются усредненными для всего объема колонки льда, а не реальными для рассолов, в которых протекают все процессы жизнедеятельности. Реальные интенсивности процессов возможно получить расчетным путем, введя поправочные коэффициенты и зная температуру морского льда в изучаемых горизонтах.

Приводя данные об активности микробных процессов в талой воде из снега и льда, необходимо отметить, что полученные результаты в полной мере не могут считаться как протекающие *in situ* и не характеризуют реальные интенсивности процессов, протекающих в снежном покрове и морском льду. Полученные данные количественно характеризуют способность живых клеток микроорганизмов проявлять активность в водной среде. Проявление активности клеток связано, в первую очередь, с изменением агрегатного состояния образцов (переход воды из кристаллической формы в жидкую). В меньшей степени несоответствие абсолютных показателей реальным интенсивностям процессов связано с повышением температуры образцов, так как экспозиция проб талой воды осуществлялась при температуре –1.4°С. При этом образцы нижнего слоя льда оставались в жидком состоянии, а более пресные образцы снега и верхнего слоя льда начинали замерзать уже в начале процесса экспозиции.

Характеристики взвеси, содержание $C_{орг}$ *и значения* $\delta^{13}C_{орг}$ *взвеси*

Проведено исследование 27 проб взвеси (табл. 3). Анализ экспериментального материала показал, что максимальная концентрация взвеси (от 3.4 до 9.0 мг/л) характерна для льда и снега (2.6–4.3 мг/л). В водной толще повышенное содержание взвеси наблюдалось только в воде из подледного слоя (ст. 2, подледный, табл. 3); в остальных пробах воды содержание взвеси колебалось от 0.9 до 1.69 мг/л. Максимальная концентрация $C_{орг}$ (189–310 мкг $C_{орг}$/л) обнаружена в ледовых пробах и подледной воде (160 мкг/л). Содержание $C_{орг}$ в снеге в 5–7 раз ниже, чем во льду (41–55 мкг/л), и немного ниже, чем в водной толще (табл. 3). Для самого северного из изученных районов (81°30′–82° N) выявлена прямая зависимость между концентрацией $C_{орг}$ во взвеси и биомассой бактерий в пробах льда и снега (рис. 2). Этот факт свидетельствуют о том, что развитие водорослей способствует заселению льда бактериями и активизации микробных процессов.

Для этого же района наблюдается зависимость значений $\delta^{13}C_{орг}$ от содержания $C_{орг}$ во взвеси из снега и льда, т.е. от величины биомассы бактерий в этих пробах (рис. 3). В образцах снега, где $C_{орг}$, в том числе в виде бактериальной биомассы, мало, изотопный состав органического углерода обеднен тяжелым изотопом ^{13}C. В составе взвеси

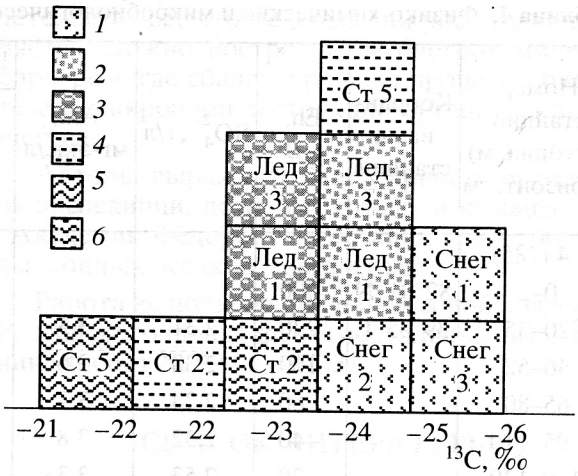

Рис. 4. Гистограмма значений $\delta^{13}C$-$C_{орг}$ в талых водах из снега и льда и во взвеси из водной толщи на полигоне 81°30′–82° N: *1* – снеговой покров; *2* – ледовый покров (верх), *3* – ледовый покров (низ), *4* – водная толща, *5* – придонная вода, *6* – подледная вода.

из снега преобладает, видимо, эоловый материал, принесенный с суши, где величины $\delta^{13}C_{орг}$ лежат в пределах –24.7…–25.8‰.

Во льдах, особенно в нижних их горизонтах, идут активные процессы осеннего цветения водорослей и развиваются сообщества гетеротрофных микроорганизмов. Именно здесь наблюдается относительно высокая интенсивность процесса CO_2 ассимиляции (табл. 2). Значения $\delta^{13}C_{орг}$ из проб ледовой взвеси и взвеси из подледного горизонта воды на ст. 2 варьируют от –22.6 до –24.4‰.

Другими словами, активные биогеохимические процессы (цветение водорослей, бактериальная активность) приводят к фракционированию изотопов углерода и к его утяжелению по сравнению с $C_{орг}$ снежного покрова, где преобладает аллохтонное органическое вещество.

Таким образом, изотопный состав $C_{орг}$ взвеси отражает наличие трех основных источников органического вещества взвеси водной толщи: эоловый, фитопланктогенный и бактериальный. Активные биогеохимические процессы, происходящие во льдах и водной толще, приводят к фракционированию изотопов и изотопному утяжелению по сравнению с эоловым и другим аллохтонным ОВ в Баренцевом море (рис. 4). Полученные значения по величинам изотопного состава органического углерода взвеси Баренцева моря заметно облегчены по сравнению с $\delta^{13}C_{орг}$ взвеси в водной толще на средних широтах между 40° S и 40° N, где $\delta^{13}C_{орг}$ варьирует от –22 до –18‰ [12]. В высоких широтах значения $\delta^{13}C_{орг}$ морской воды могут быть обеднены тяжелым изотопом ^{13}C на 5–10‰, в том числе за счет фракционирования в процессе фотосинтеза и при бактериальных

Таблица 4. Физико-химические и микробиологические характеристики донных осадков Баренцева моря

Номер станции (глубина, м) Горизонт, см	Координаты станции	Eh, мВ	SO_4^{2-}, г/л	Alk, мг-экв./л	Интенсивность микробных процессов				Численность бактерий, клеток × $\times 10^8$/г сырого ила	Содержание метана мкл/дм^3
					1*	2**	3***	4****		
Ст. 4 (785)										
0–2	82°01′ N	400			19	14	9.4	0	6.3	3.1
20–35	39°05′ E	270	2.31	3.5	58	25	10	0	4.4	3.5
46–52		160	2.38	3.6	11	37	6.2	0	2.1	3.6
65–80		60	2.34	3.7	27	16	6.6	11	1.5	3.3
95–110		–40	2.32	3.8	13	21	6.2	4.5	1.5	3.5
110–130		–20	2.53	3.3	10	22	11	2.5	1.0	3.8
145–160		–10	2.38	4.0	6.4	9.8	9.0	0	0.8	4.0
Ст. 7 (365)										
0–5	80°32′ N	180	–	–	75	24	4.2	0	6.0	1.0
10–20	43°41′ E	120	3.18	3.5	8.6	19	5.8	210	2.2	2.3
40–47		100	2.93	3.0	7.0	31	12	538	0.5	3.9
70–77		80	2.83	3.2	8.8	18	96	112	0.8	7.0
150–157		30	2.55	5.5	7.2	38	28	0	0.8	9.5
Ст. 9 (350)										
0–2	80°24′ N	440	2.81	3.1	67	16	98	0	5.5	15.0
5–9	41°34′ E	200			22	5.1	26	0	3.0	9.7
9–21		120	2.60	3.1	13	9.0	40	261	3.3	9.5
45–60		–20	2.76	3.2	11	25	26	4.8	2.5	9.8
85–110		–10		3.3	9.8	30	51	137	2.1	19.3
120–135		–10	2.45	3.4	9.0	17	24	190	2.3	9.2
165–170		–30	–	–	6.0	19	12	0	2.0	4.5
Ст. 16 (336)										
0–2	79°21′ N	370	2.74	3.1	124	13	28	0	1.7	4.7
15–30	39°34′ E	190	2.78	3.5	43	12	6.4	0	0.35	2.2
65–80		–130	2.56	3.4	24	7	3.0	74	0.25	1.5
110–130		–15	2.55	3.6	8	11	14	36	0.21	5.9

* Интенсивность потребления глюкозы, мкг С/(дм^3 сут).
** Интенсивность темновой фиксации $^{14}CO_2$, мкг С/(дм^3 сут).
*** Интенсивность окисления ^{14}С-метана, нл/(дм^3 сут).
**** Интенсивность бактериальной сульфатредукции, мгк S/(дм^3 сут).

процессах, а также за счет высокой концентрации липидов в составе фитопланктона и присутствия изотопно-легкого аллохтонного материала суши. Долю каждой из этих составляющих еще предстоит определить.

Общая численность и интенсивности микробных процессов в донных осадках

Впервые получены данные по численности и интенсивностям микробных процессов в донных осадках центральной Арктики севернее 81° N (табл. 4). Количество бактерий в верхнем горизонте осадков достигало (1.7–6.3) × 10^8 кл/г влажного ила. На глубине 20–130 см численность бактерий снижалась, составляя (0.25–2.3) × 10^8 кл/г осадка. Практически такая же численность наблюдалась в донных осадках центральной и южной части Баренцева моря во время исследований, проводимых нами на НИС "Академик Вавилов" в 1997 г.

Интенсивности процесса бактериальной сульфатредукции определены в четырех колонках донных осадков (табл. 4). Показано, что в колонке осад-

13. *Шевченко В.П., Леин А.Ю., Зернова В.В. и др.* Распределение и состав взвешенного материала и фитопланктона в поверхностном слое Норвежского и Гренландского морей в августе 1996 года // Докл. РАН. 1997. Т. 355а (6). С. 930–934.

14. *Беляев С.С., Лауринавичус К.С., Иванов М.В.* Определение интенсивности процесса микробиологического окисления метана с использованием $^{14}CH_4$ // Микробиология. 1975. Т. 44. Вып. 3. С. 542–545.

15. *Гальченко В.Ф., Горлатов С.Н., Токарев В.Г.* Микробиологическое окисление метана в осадках Берингова моря // Микробиология. 1986. Т. 55. Вып. 4. С. 669–673.

16. *Гальченко В.Ф.* Сульфатредукция, метанобразование и метанокисление в различных водоемах оазиса Бангер Хиллс, Антарктида // Микробиология. 1994. Т. 63. Вып. 4. С. 683–698.

17. *Крисс А.Е.* Микробное население в районе Северного полюса // Тр. Института микробиологии. 1958. № 5. С. 186.

18. *Мишустина И.Е., Батурина М.В., Саввичев А.С.* Микрофлора Баренцева моря во время полярной ночи // Тез. Докл. II Всесоюзн. съезда океанологов. Севастополь, 1982. Вып. 5(1). С. 25–26.

19. *Намсараев Б.Б., Русанов И.И., Мицкевич И.Н. и др.* Бактериальное окисление метана в эстуарии реки Енисей и Карском море // Океанология. 1995. Т. 35. № 1. С. 88–93.

20. *Савельев Б.А.* Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоемов. М.: Изд-во МГУ, 1963. 541 с.

21. *Мельников И.А.* Экосистема Арктического морского льда. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова. 1989. 191 с.

22. *Pimenov N., Savvichev A., Rusanov I., Lein A., Ivanov M.* Microbial processes of carbon and sulfur cycles in the holocene sediments of arctic seas PACON-99. June 23–25, 1999, Moscow. P. 202.

Microbiological Explorations in the Northern Part of the Barents Sea in the Early Winter Season

A. S. Savvichev*, I. I. Rusanov*, N. V. Pimenov*, I. N. Mitskevich*, I. T. Bairamov*, A. Yu. Lein, and M. V. Ivanov***

**Institute of Microbiology, Russian Academy of Sciences, pr. 60-letiya Oktyabrya 7, k. 2, Moscow, 117811 Russia*

***Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr. 36, Moscow, 117218 Russia*

Abstract—The total number of microorganisms and rates of microbial processes of the carbon cycle were determined in snow, sea ice, water, and seafloor sediments of the northern part of the Barents Sea from September to October, 1998. The explorations were carried out in two areas: along the trajectory from Franz Josef Land to Victoria Island and along the continental slope region covered with solid ice at latitude 81°–82° N and longitude 37°–39° E. At the time of study, the ice cover was represented by thick one-year old ice (up to 1.2 m), perennial ice (up to 1.85 m), and pack ice. The number of bacteria in the snow cover, sea ice, and seawater was 12 to 14, 50 to 110, and 10 to 240 × 10^3 cells/ml, respectively. Rates of CO_2-assimilation in the absence of light, glucose utilization, and methane oxidation by bacteria were determined. The highest rate of microbial processes was found in samples of the lowermost newly formed sea ice. The lowest level of activity for all processes was observed from melted snow water. A direct relation was shown between the concentration of C_{org}, the bacterial biomass, and the values of $\delta^{13}C_{org}$ in mixtures of melted snow and ice. The number of microorganisms and rates of microbial processes in seafloor sediments measured at the stations on the continental slope are comparable to those in the central part of the Barents Sea and the northern part of the Kara Sea.

Key words: microbial processes, microorganisms, carbon cycle, methane oxidation, sulfate reduction, Barents Sea.

ков материкового склона (ст. 4, глубина 785 м) процесс сульфатредукции протекал в горизонтах, расположенных на границе аэробных и анаэробных условий, достигая 11 мкг S/(дм^3 сут). В нижележащих горизонтах интенсивность процесса сульфатредукции снижалась. При этом содержание сульфатов в поровой воде осадков по всей глубине колонки практически не снижалась. По-видимому, низкая скорость бактериальной сульфатредукции в нижних горизонтах определяется исчерпанием доступного органического вещества. В колонках донных осадков, отобранных на разрезе ЗФИ–о. Виктория (ст. 7, 9, 16, глубины 336–365 м) на отдельных горизонтах интенсивность сульфатредукции достигала значительных величин (112–538 мкг S/(дм^3 сут)). Полученные величины близки к интенсивностям сульфатредукции в донных осадках Баренцева моря (до 800 мкг S/(дм^3 сут)), 11 рейс НИС "Академик Вавилов" [22]).

В донных осадках четырех станций определена интенсивность окисления $^{14}CH_4$. При содержании метана 3.1–19.3 мкг/дм^3 сырого ила интенсивность его окисления составила 3.0–98 нл CH_4/(дм^3 сут). Полученные величины скоростей бактериального окисления метана выше данных В.Ф. Гальченко [15], показавшего, что в осадках Берингова моря интенсивность окисления CH_4 варьирует от 1.5 до 20 нл CH_4/(дм^3 сут) при содержании метана 0.24–8.0 мкл/дм^3. В наших исследованиях максимальная интенсивность метанокисления была выявлена в поверхностных окисленных горизонтах. В исследованиях В.Ф. Гальченко было показано, что наиболее интенсивно процесс метанокисления протекал в подповерхностных восстановленных горизонтах осадков с Eh = –110…–440 Мв. Для сравнения, в осадках северной части Карского моря скорость окисления метана составляла 4.5–33.8 нл CH_4/(кг сут) [19], что близко к нашим данным.

Для определения общего гетеротрофного потенциала были проведены эксперименты по определению интенсивности потребления [^{14}C]-глюкозы. Максимум интенсивности потребления [^{14}C]-глюкозы был отмечен в поверхностных горизонтах донных осадков (ст. 7, 9, 16). В осадке ст. 4 наиболее активный процесс зафиксирован в горизонте 20–35 см.

Таким образом, впервые определены реальные скорости микробных процессов в осадках Баренцева моря севернее 80° N. Ведущим фактором, определяющим интенсивность их протекания, является доступность органического вещества, в то время как низкая температура и круглогодичный ледовый покров не оказывают существенного влияния на активность микроорганизмов донных осадков. Полученные нами количественные данные активности микробных процессов также свидетельствуют, что ледовый покров Арктики является сложно построенным биогеохимическим барьером, где сбалансированы процессы биосинтеза и микробной деструкции органического вещества.

Авторы выражают благодарность руководству экспедиции, ледовому отряду и команде НЭС "Академик Федоров" за помощь при отборе воды, донных осадков, снега и льда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 99-04-48733).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаченко Б.Л.* Исследование над бактериями Северного ледовитого океана // Тр. мурм. научн.-промысл. экспедиции 1906–1914 гг. Петроград, 1914. 297 с.
2. *Буткевич В.С.* О бактериальном населении морских вод в высокоширотных арктических районах // Докл. АН СССР. 1938. Т. 19. № 8. С. 651–652.
3. *Россова Э.Я.* Некоторые данные о численности, продукции бактериопланктона в юго-восточной части Баренцева моря // Океанология. 1977. Т. 17. № 5. С. 878–882.
4. *Байтаз В.А., Байтаз О.Н., Мишустина И.Е.* Морфометрия клеток, численность и биомасса основных морфологических групп бактериопланктона Баренцева моря // Океанология. 1996. Т. 36. № 6. С. 883–887.
5. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Потоки и массы органического углерода в океане // Геохимия. 1997. № 9. С. 945–952.
6. *Smith R.E.H., Clement P.* Heterotrophic activity and bacterial productivity in assemblaged of microbes from sea ice in high arctic // Polar Biol. 1990. V. 10. № 5. P. 351–357.
7. *Helmke E., Weyland H.* Abudance, distribution and activity of Antarctic Sea ice bacteria during winter // Abstr. 6th Int. Symp. Microb. Ecology (ISME-6). Barselona, Spain, 1992. P. 272.
8. *Bell W.H., Land J.M., Mitchell R.* Selective stimulation of marine bacteria by algal extracellular products // Limnol. Oceanogr. 1974. V. 19. P. 833–839.
9. Grossi S.McG., Kottmeier S.T., Sullivan S.W. Sea ice microbial communities. Seasonal abudance of microalgae and associated bacteria, McMurdo Sound Antarctica // Microb. Ecol. 1984. V. 10. P. 231–242.
10. *Smith R.E., Clement P., Cota G.F.* Populations dynamics of bacteria in arctic sea ice // Microb. Ecol. 1989. V. 17. № 1. P. 63–76.
11. *Леин А.Ю., Русанов И.И., Саввичев А.С. и др.* Биогеохимические процессы циклов серы и углерода в Карском море // Геохимия. 1996. № 11. С. 1027–1044.
12. *Goericke R., Fry B.* Variations of marine plankton δ^{13}C with latitude, temperature and dissolved CO_2 in the World Ocean // Global Biogeochem. Cycles. 1994. V. 8. P. 85–90.