

УДК 551.465

БАКТЕРИОПЛАНКТОН ШЕЛЬФОВОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2015 г. Н. Д. Романова, А. Ф. Сажин

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: Romanova-Nadya@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.05.2015 г.

Основываясь на анализе структурно-функциональных характеристик бактериопланктона шельфовой части Карского моря были выделены основные области, отличающиеся по характеру распределения микробиоты. Эстуарные зоны характеризуются высокими показателями обилия и продукции бактериопланктона, на прилежащем к эстуарию шельфе, несмотря на сохраняющееся высокое обилие бактериопланктона, снижается величина его продукции. В юго-западной части Карского моря численность бактерий невысока, и активное его развитие, по всей видимости, зависит от доступности автохтонного органического вещества. В северной части шельфа Карского моря наблюдаются высокие показатели обилия и продуктивности бактериопланктона в распресненном слое воды. Для верхнего слоя воды над склоном желоба Св. Анны характерны низкие величины обилия бактерий и крайне низкие, вплоть до нулевых, значения продукции микроорганизмов. Показано, что для анализа количественных изменений бактериопланктона в шельфовой части Карского моря в большинстве случаев достаточно использовать данные для верхнего перемешанного слоя воды.

DOI: 10.7868/S0030157415060179

В настоящее время Карское море является одним из наиболее перспективных для промышленной разработки районов Российской Арктики, но, как ни удивительно, до недавних пор оно оставалось одним из самых малоизученных шельфовых арктических морей. Важнейшим фактором для оценки эффективности утилизации аллохтонного органического вещества (в том числе загрязнений) и функционирования планктонного сообщества является активность бактериопланктона. Роль этого компонента заключается как в деструкции и реминерализации остатков живых организмов и аллохтонного вещества, так и в концентрации в собственных клетках растворенных в воде органических элементов. В полярных экосистемах микробная компонента планктона важна еще и потому, что в условиях недостатка света осмотрфные микроорганизмы, способные эффективно усваивать растворенное органическое вещество, становятся основой пищевой цепи. В связи с этим в данной работе мы попытаемся охарактеризовать структурные и функциональные особенности бактериопланктона различных районов шельфа Карского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материал был собран в ходе 54- и 59-го рейсов НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карском море в августе–сентябре 2007 и 2011 гг. (рис. 1).

Для учета общей численности бактерий (ОЧБ) использовали метод прямого счета клеток, окрашенных флуорохромом DAPI, под люминесцент-

ным микроскопом [6]. Линейные размеры клеток измеряли при помощи окуляр-микрометра или программы анализа изображений “ImageScore-Color M”. Бактериальную биомассу в углеродных единицах рассчитывали по [4]. Продукцию бактерий определяли прямым методом с использованием антибиотиков-ингибиторов бактериального роста [8, 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании географического строения Карского моря в его шельфовой части можно выделить три принципиально различных района: область эстуариев рек Оби и Енисея; зону, мало подверженную влиянию речного стока к западу от п-ова Ямал, и район южной оконечности глубоководных желобов Св. Анны и Воронина.

В области эстуариев и прилежащего к ним шельфа основным фактором, определяющим свойства биотопа, является соленость. В эстуарии Оби в южной (или “речной”, с соленостью менее 5 psu) части разреза средняя для слоя над термоклином ОЧБ составляла 505 ± 197 тыс. кл/мл, мористее она возрастала до 723 ± 146 тыс. кл/мл (рис. 2а). Сходное распределение наблюдалось и для биомассы бактерий (14.2 ± 6.5 и 21.3 ± 3.8 мгС/м³). Величина удельной продукции бактерий в “речной” воде была существенно выше, нежели в мористой части эстуарной зоны, составляя 0.54 и 0.18 сут⁻¹ соответственно. В слое воды под пикноклином обилие бактериопланктона резко снижалось до 376 ± 64 тыс. кл/мл (8.1 ± 4.6 мгС/м³), а удельная

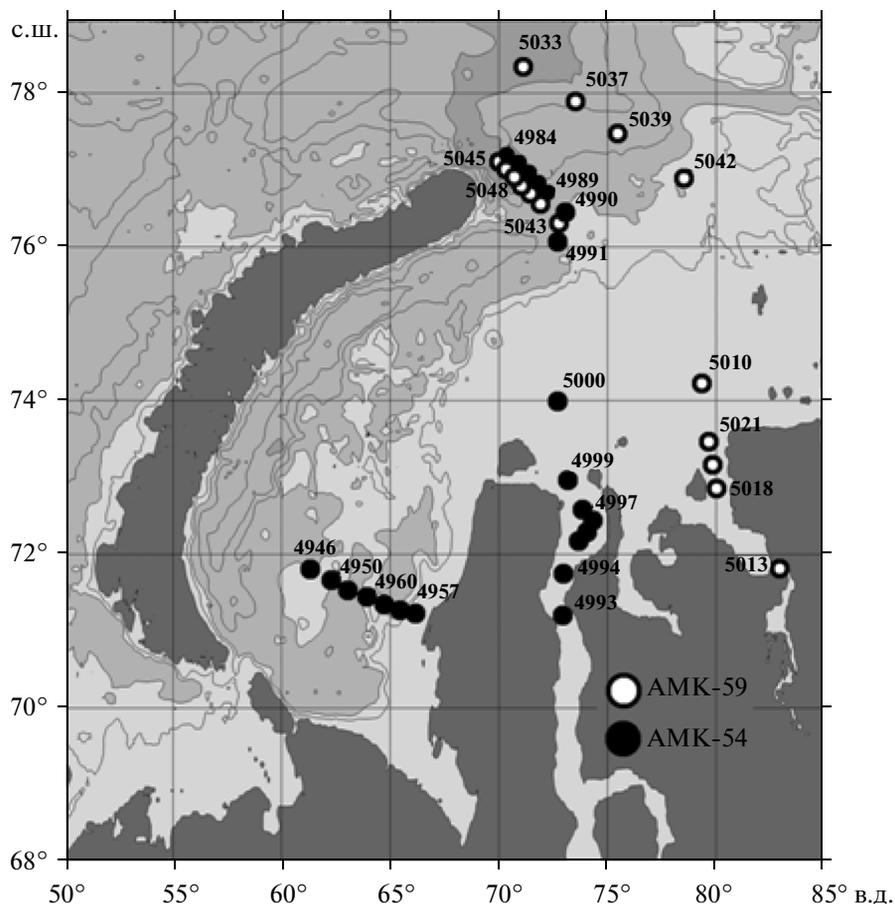


Рис. 1. Карта станций.

продукция бактерий была даже чуть выше, чем в верхнем перемешанном слое, и составляла в среднем 0.6 сут^{-1} . Отдельного внимания заслуживают бактерии придонного слоя холодной воды. Их численность составляла всего $223 \pm 45 \text{ тыс. кл./мл}$, однако величина удельной продукции микроорганизмов была максимальной для всей области эстуария: 1.3 сут^{-1} .

На разрезе вдоль эстуария Енисея значения ОЧБ в “речной” его части были намного выше, чем в Оби ($2079 \pm 185 \text{ тыс. кл./мл}$), однако в водах соленостью более 5 psu этот показатель снижался по направлению к морю с 888–1045 до 144 тыс. кл./мл (рис. 2б). Биомасса бактериопланктона также достигала максимальных значений в “речной” воде: $35.4 \pm 14.6 \text{ мгС/м}^3$, тогда как при солености 5–25 psu ее значения колебались в пределах 10.9–16.7 мгС/м³ (в среднем $13.7 \pm 3.2 \text{ мгС/м}^3$). На крайней морской станции этот параметр снижался до 4.8 мгС/м³. Активный рост бактерий наблюдался только в “речной” воде, где величина удельной продукции достигала 2 сут^{-1} , мористее этот показатель снижался до 0.1 сут^{-1} . В слое воды под пикноклином обилие бактериопланктона было существенно

ниже, составляя в среднем $119 \pm 20 \text{ тыс. кл./мл}$ ($4.9 \pm 1 \text{ мгС/м}^3$). Величины продукции были близки к нулю, и только в слое придонной “зимней” воды удельная продукция достигала 0.06 сут^{-1} .

В районе к западу от п-ова Ямал, мало подверженном влиянию речного стока, можно выделить области внутреннего и срединного шельфа, разделенные Ямальским течением, а также прибрежную область (рис. 2в). Максимальные значения ОЧБ наблюдались в прибрежье и составляли $748 \pm 47 \text{ тыс. кл./мл}$ ($34.4 \pm 0.01 \text{ мгС/м}^3$). В области внутреннего шельфа, в верхнем перемешанном слое воды обилие бактерий составляло $60 \pm 10 \text{ тыс. кл./мл}$ ($2.2 \pm 0.7 \text{ мгС/м}^3$) и увеличивалось в придонном слое до $139 \pm 18 \text{ тыс. кл./мл}$ ($5.7 \pm 1.1 \text{ мгС/м}^3$). Несмотря на это, значения продукции бактериопланктона в придонном слое воды были близки к нулю, тогда как в верхнем перемешанном слое ее величина составляла 6.2 и 0.4 мгС/м³ в сутки на прибрежной станции и в области внутреннего шельфа соответственно. Средние значения удельной продукции бактерий составляли 0.18 сут^{-1} .

Над срединным шельфом к западу от п-ова Ямал, в верхнем перемешанном слое обилие бактерий бы-

ло немного выше, чем в области внутреннего шельфа, составляя 94 ± 16 тыс. кл/мл (4 ± 1.2 мгС/м³). В нижележащих слоях воды значения ОЧБ были крайне низки и различались мало: в среднем этот параметр составлял 21 ± 7 тыс. кл/мл (0.8 ± 0.3 мгС/м³). Величина удельной продукции в верхнем перемешанном слое также была выше, чем над внутренним шельфом, и составляла 0.36 сут⁻¹. В нижележащих слоях воды этот параметр уменьшался до 0.22 сут⁻¹. В придонных водах бактериальный рост практически отсутствовал, и удельная продукция имела нулевые значения.

На севере шельфовой части Карского моря распространение распресненной воды ограничено поворачивающей на восток струей Восточно-Новоземельского течения [2]. Обилие бактериопланктона в северной части шельфа Карского моря, в верхнем распресненном слое и в 2007, и в 2011 гг. было выше, чем в среднем в открытой части моря (128 ± 18 и 257 ± 8 тыс. кл/мл соответственно) (рис. 3). Биомасса бактерий при этом составляла 4.3 ± 1.2 и 3.4 ± 0.1 мгС/м³ соответственно. Над склоном желоба Св. Анны, где нет влияния распресненной воды, численность бактериопланктона в верхнем перемешанном слое была существенно ниже и составляла 30 ± 8 и 92 ± 33 тыс. кл/мл (1.3 ± 0.4 и 2.2 ± 0.5 мгС/м³) в 2007 и 2011 гг. соответственно. Значения обилия бактерий в восточном отроге желоба Св. Анны в 2011 г. были вдвое ниже наблюдавшихся в тот же год в западном отроге. Тем не менее, в нем также прослеживалась двукратная разница между численностью бактерий в распресненной воде и в верхнем перемешанном слое над склоном желоба: 127 ± 5 и 58 ± 6 тыс. кл/мл (5.4 ± 1.1 и 2.2 ± 0.3 мгС/м³) соответственно. В нижележащих слоях воды обилие бактерий имело близкие значения в разные годы как над северной границей шельфа, так и в обоих отрогах: 20 ± 3 и 28 ± 3 тыс. кл/мл в западном отроге в 2007 и 2011 гг. соответственно и 28 ± 7 тыс. кл./мл в восточном. Средние значения биомассы бактериопланктона составляли 0.9 ± 0.2 и 1 ± 0.2 мгС/м³ в западном отроге в 2007 и 2011 гг. соответственно и 0.8 ± 3 мгС/м³ в восточном отроге в 2011 г.

Данные по продукции бактериопланктона в распресненном слое воды в северной части шельфа Карского моря есть только для 2011 г. У западного отрога желоба ее значения составили 4.2 мгС/м³ в сутки (удельная продукция 1.16 сут⁻¹), тогда как над шельфом, прилегающим к восточному отрогу, роста бактерий отмечено не было. Также близкие к нулю значения продукции бакте-

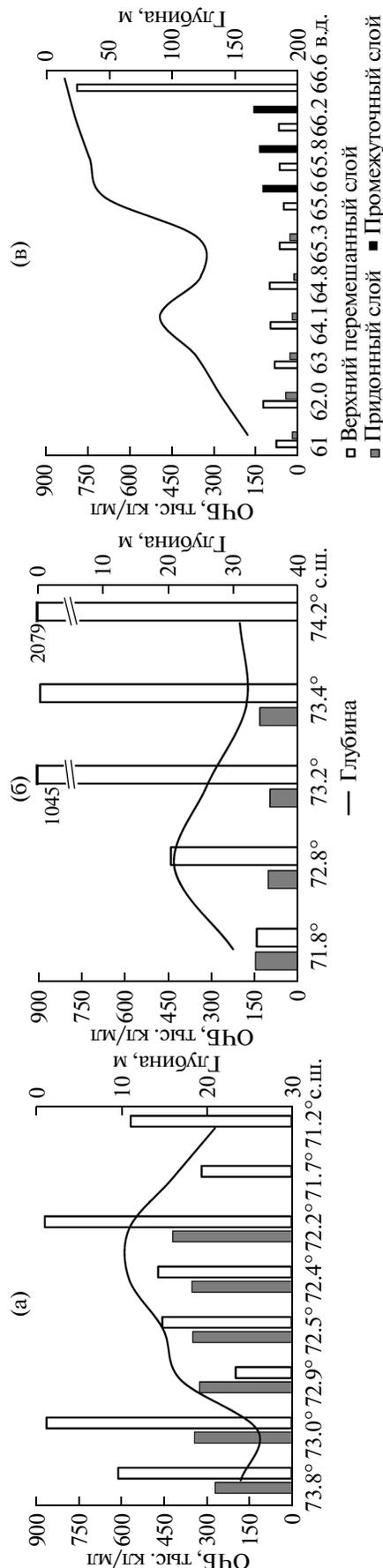
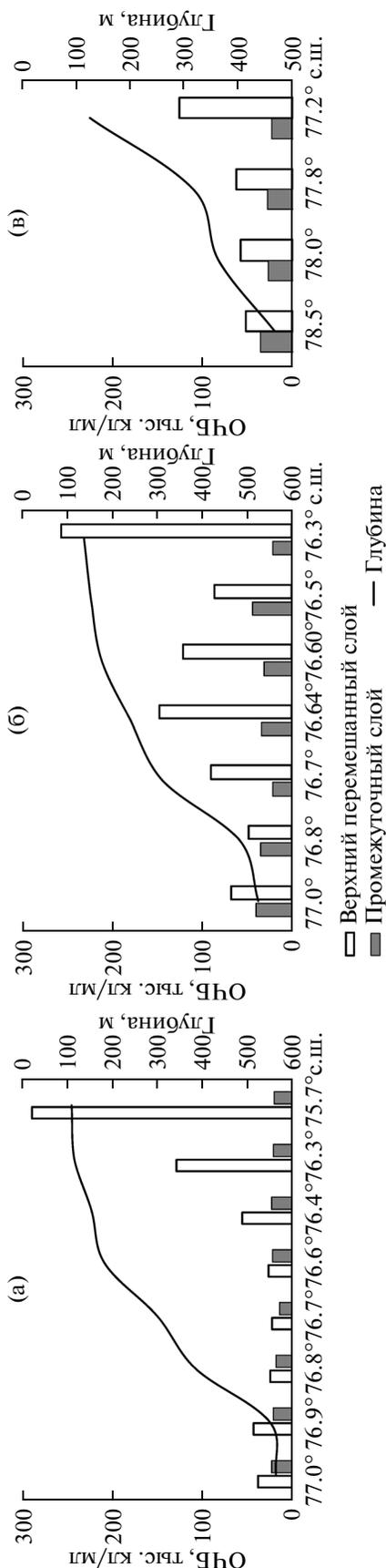


Рис. 2. Обилие бактериопланктона (ОЧБ, тыс. кл/мл) на разрезе (а) вдоль эстуария Оби (б) вдоль эстуария Енисея (в) в юго-западной части Карского моря.



риопланктона наблюдались в верхнем перемешанном слое воды над склоном желоба в 2007 г. В 2011 г. удельная продукция микроорганизмов над склоном западного и восточного отрогов желоба Св. Анны составляла 0.3 и 0.7 сут⁻¹ соответственно. В нижележащих слоях воды величина удельной продукции бактерий была достаточно стабильна и составляла в западном отроге желоба 0.32 и 0.39 сут⁻¹ в 2007 и 2011 гг. соответственно, а в восточном — 0.5 сут⁻¹ в 2007 г. Отдельно стоит выделить слой придонной воды в восточном отроге желоба Св. Анны. Величина удельной продукции бактерий в нем составляла 1.1 сут⁻¹, а сама продукция достигала 2 мгС/м³ в сутки.

В морфологическом составе бактериопланктона шельфовой области Карского моря доминировали коккоидные формы (60–100%), средние размеры клеток варьировали от 0.02 до 0.14 мкм³, однако достоверных закономерностей в распределении этих параметров выявлено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение наших и литературных данных по обилию бактериопланктона в верхнем слое воды в летний и осенний сезоны в Карском море показывает, что в области эстуариев межгодовые вариации этого параметра могут быть в пределах порядка значений (таблица). Несмотря на существенную разницу в численности бактериопланктона в 2001 [7] и 2007 гг., результаты измерения продукции в эстуарии Оби очень близки: 7.1 и 4.7 мгС/м³ в сутки для реки и эстуария соответственно в 2001 г., и 7.3 и 3.8 мгС/м³ в сутки в 2007 г. для тех же областей.

Концентрация бактериопланктона в юго-западной части Карского моря в августе–октябре 1991 г. колебалась в пределах от 7 до 128 тыс. кл./мл в верхнем 30-метровом слое [3]. Примерно такой же разброс значений ОЧБ на разных горизонтах (от 10 до 139 тыс. кл./мл) наблюдался и во время наших работ.

В северо-западной части шельфа Карского моря в августе–октябре 1991 г. концентрация бактерий достигала 250 тыс. кл./мл. Летом 2001 г. на границе шельфа с восточным отрогом желоба Св. Анны, величина бактериальной численности в поверхностном слое воды составляла 360 тыс. кл./мл [7]. В период наших наблюдений этот параметр был почти в три раза ниже (127 тыс. кл./мл), однако величина продукции бактериопланктона, измеренная на ближайшей

Рис. 3. Обилие бактериопланктона в Карском море (ОЧБ, тыс. кл./мл) на разрезе вдоль желоба Св. Анны. (а) – Западный отрог 2007 г., (б) – Западный отрог 2011 г., (в) – Восточный отрог 2011 г.

Сезонная и межгодовая изменчивость бактериопланктона эстуариев Оби и Енисея прилегающего шельфа

	Сезон \ Год	Обь			Енисей	
		1993*	2001**	2007	2001**	2011
Река	Лето	—	1426 ± 461	—	1468 ± 160	
	Осень	206 ± 61	—	505 ± 116		2079 ± 185
Шельф	Лето	—	2092 ± 666	—	1850 ± 162	
	Осень	173 ± 59	—	723 ± 146		964 ± 111

* Мицкевич, Намсараев [4].

** Мсеп, Амон [7].

станции, вполне сопоставима с данными немецких авторов (1.1 и 1.9 мгС/м³ в сутки соответственно).

Основываясь на анализе структурно-функциональных характеристик бактериопланктона шельфовой части Карского моря, можно выделить следующие основные области, отличающиеся по характеру распределения микробиоты:

Эстуарная зона, характеризующаяся высокими показателями обилия бактериопланктона и его продукции. В речной ее части (соленость < 5 psu) концентрация бактериопланктона может достигать нескольких миллионов клеток/мл, а продукция — десятков мгС/м³ в сутки. В мористой части эстуарной зоны величины бактериального обилия также могут достигать высоких значений, однако показатели удельной продукции ниже. Также наблюдается постепенное снижение концентрации бактериопланктона в верхнем распресненном слое по мере удаления от эстуария.

В северо-западной части Карского моря, практически не подверженной влиянию речного стока, можно выделить область внутреннего шельфа, характеризующуюся относительно невысоким обилием бактериопланктона (50–70 тыс. кл/мл в период наших наблюдений), но относительно низкой его активностью. Также в зоне внутреннего шельфа отмечены более высокие показатели обилия бактериопланктона в придонном слое (120–160 тыс. кл/мл), однако активность микроорганизмов здесь близка к нулю. Возможно, их попадание в водную толщу обусловлено взмучиванием осадков при воздействии приливно-отливных течений [1]. Область срединного шельфа в период наших наблюдений характеризовалась более высокими значениями обилия бактериопланктона (63–124 тыс. кл/мл) и вдвое большими значениями удельной продукции (0.36 сут⁻¹) в верхнем перемешанном слое. Возможно, наблюдающиеся отличия обусловлены тем, что в период работ в данном районе была отмечена терминальная стадия “цветения” фитопланктона и, следовательно, бактерии были обеспечены лабильным органическим веществом [5].

В северной части шельфа Карского моря можно выделить область распространения распресненных вод (с соленостью менее 30 psu), которые характеризуются относительно высокими величинами обилия бактериопланктона (120–260 тыс. кл/мл осенью и до 470 тыс. кл/мл в летний период [7]). Также в распресненном слое, проникающем до южной границы желоба Св. Анны, отмечены относительно высокие значения продукции бактерий (1.1–4.2 мгС/м³ в сутки). Область над склоном желоба, напротив, можно охарактеризовать более низкими значениями обилия бактерий (30–92 тыс. кл/мл) и крайне низкими, вплоть до нулевых, значениями продукции.

ВЫВОДЫ

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что при рассмотрении количественных характеристик бактериопланктона Карского моря наиболее репрезентативными являются пробы из верхнего перемешанного слоя, где наиболее ярко выражена изменчивость в условиях среды. В более глубоких слоях воды численность бактериопланктона настолько низка, что возможные различия между пробами не превышают величину погрешности измерений. Однако, при учете функциональных характеристик бактериопланктона, стоит принять к рассмотрению процессы не только в верхнем перемешанном слое, но и во всем столбе воды, в первую очередь, в придонных водах, где при небольших колебаниях обилия бактерий могут происходить активные деструкционные процессы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095, лабораторная обработка материалов и подготовка статьи) и проекта РФФИ № 14-17-00681 (сбор полевого материала).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д. Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2010 г. по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 842–849.

2. *Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Демидов А.Н. и др.* Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
3. *Мицкевич И.Н., Намсараев Б.Б.* Численность и распределение бактериопланктона в Карском море в сентябре 1993 г. // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 704–708.
4. *Романова Н.Д., Сажин А.Ф.* Взаимосвязь между объемом бактериальных клеток и содержанием в них углерода // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 4. С. 556–565.
5. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Сергеева В.М., Кременецкий В.В.* Фитопланктон юго-западной части Карского моря // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 6. С. 1039–1053.
6. *Hoff K.A.* Total and specific bacterial counts by simultaneous staining with DAPI and flouochrome-labeled antibodies // *Handbook of methods in aquatic microbial ecology* / Eds. Kemp P.F. et al. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 1993. P. 149–154.
7. *Meon B., Amon R.M.W.* Heterotrophic bacterial activity and fluxes of dissolved free amino acids and glucose in the Arctic rivers Ob, Yenisei and the adjacent Kara sea // *Aquat. Microb. Ecol.* 2004. V. 37. P. 121–135.
8. *Sherr B.F., Sherr E.B., Andrew T.L. et al.* Trophic interactions between heterotrophic Protozoa and bacterioplankton in estuarine water analyzed with selective metabolic inhibitors // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1986. V. 32. P. 169–179.
9. *Weisse T.* The microbial loop in the Red sea: dynamics of pelagic bacteria and heterotrophic nanoflagellates // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1989. V. 55. P. 241–250.

Bacterioplankton of the Shelf Zone of the Kara Sea

N. D. Romanova, A. F. Sazhin

The principal zones of the Kara Sea shelf were defined on the basis of structural and functional characteristics of bacterioplankton. Estuarine regions were characterized by elevated bacterial abundance and production rates. On the adjacent shelf bacterial numbers remain high but production values decrease. In the south-western part of the sea bacterial abundance is relatively low and the activity of microorganisms depends on the availability of allochthonic organic matter. In the northern part of the Kara Sea shelf high bacterial abundance and growth rate are observed in the upper brackish water layer. In the upper water layer upon the slope of St. Anna trough bacterial numbers are low and production rates decline almost to zero values. It was pointed out that the analyze of bacterial abundance in the upper mixed layer is enough for the characterization of quantitative changes in bacterial community of the shelf zone.