

БАЗОВЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОД ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

В.Ю. Федулов, Н.А. Беляев, А.В. Колоколова, А.Ф. Сажин

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д.36, e-mail: fedulov.vy@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 02.02.2018, одобрена к печати 26.04.2018

Приведены данные по распределению взвешенного вещества, растворенного и взвешенного органического углерода, хлорофилла «а» и феофитина в верхнем слое вод юго-западной части Карского моря в зимний период. Впервые получены значения концентраций вышеуказанных параметров для февраля-марта. Показано резкое различие их распределения для открытой части моря и зоны речного стока и существенное снижение средних значений всех показателей по сравнению с весенним и летним периодами.

Ключевые слова: Карское море, зимний период, взвесь, органический углерод, хлорофилл «а», поверхностный слой вод

Введение

К настоящему времени экосистема Карского моря является наиболее подробно изученной среди морей Российской Арктики (Романкевич, Ветров, 2001; Флинт, 2010; Экосистема Карского моря, 2015; Stein et al., 2003). Однако практически все исследования в Карском море проводились в летний и осенний периоды, хотя сезонные изменения играют в арктических морях определяющую роль. В 2016 г. появилась возможность проводить попутные исследования в ходе регулярных рейсов судов компании «Норильский Никель» по маршруту Мурманск – Дудинка (Сажин и др., 2017) в периоды тяжелой ледовой обстановки в Карском море. В настоящей работе впервые определено содержание и описаны тенденции распределения взвешенного вещества, взвешенного и растворенного органического углерода, хлорофилла «а» и феофитина в поверхностном слое вод в зимний период.

Материалы и методы

Отбор проб проводился в ходе рейса дизель-электрохода «Норильский никель», проходившего с 26 февраля по 14 марта 2017 года. Судно следовало по маршруту Мурманск – Дудинка – Мурманск (рис. 1А). В период проведения исследований средняя температура воздуха в Карском море составляла -12°C (-6 , -22°C). Поверхность моря по пути следования судна преимущественно была покрыта льдом, лишь изредка наблюдались свободные ото льда участки воды. Фиксировались как сплошные ле-

довые поля толщиной до 1 м, так и участки сплоченного мелкобитого льда. Граница мелкобитого льда и сплошных ледовых полей располагалась между ст. 3 и 14.

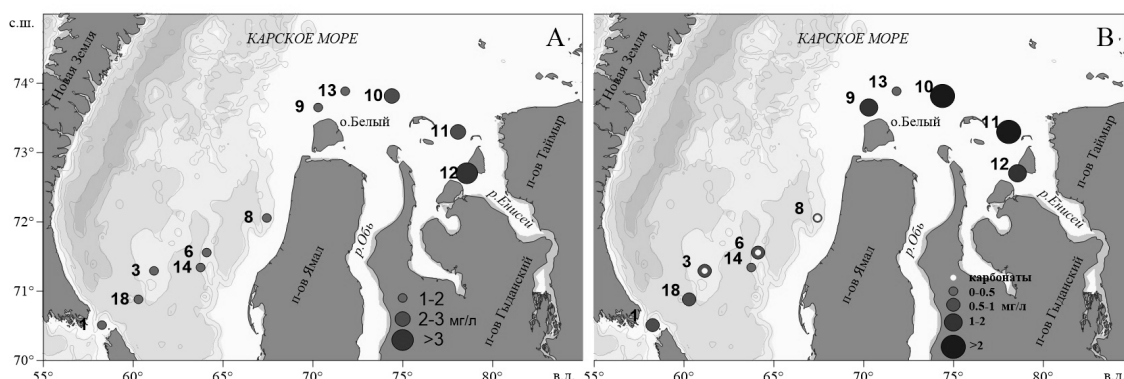


Рис. 1. Содержание растворенного органического углерода (А) и взвешенного вещества (В) в поверхностном слое вод Карского моря в феврале-марте 2017 г.

Пробы морской воды отбирались ведром из разводий на покрытой льдом поверхности моря по ходу движения судна в 30 л полиэтиленовую емкость, из которой сразу после окончания отбора проводился отбор проб воды на различные виды анализов (Сажин и др., 2017). Таким образом, обеспечивалась гомогенизация пробы на этапе отбора. За время отбора пробы судно успевало продвинуться на 2–3 мили. Повышенное внимание уделялось предотвращению загрязнения проб на палубе судна, исключался контакт пробоотборника и отбираемой пробы с любыми палубными конструкциями и бортом судна, пробоотбор осуществлялся с наветренной части максимально близко к носовой оконечности.

Определение температуры поверхностного слоя воды осуществлялось LCD-термометром (HANNA Checktemp1). Измерение производили на борту, сразу после отбора пробы. Соленость воды определяли в лабораторных условиях солемером Kelilong PHT-028.

Для определения общей концентрации взвешенного вещества (взвеси) пробы морской воды объемом 1.5–5 л фильтровали под вакуумом (0.4 атм.) через предварительно взвешенные лавсановые ядерные фильтры диаметром 50 мм с размером пор 0.45 мкм (Кравчишина, 2009). Определение весов фильтров и расчет концентраций взвеси проводили в стационарной лаборатории в ИО РАН. Как и в предыдущих исследованиях Карского моря (Беляев и др., 2010, 2015; Сажин и др., 2017), для определения растворенного (РОУ) и взвешенного (ВОУ) органического углерода, а также содержания карбонатов во взвеси, пробы фильтровали через предварительно прокаленные при 430°C фильтры GF/F диаметром 47 мм с условным диаметром пор 0.7 мкм. После фильтрации фильтры замораживали и хранили при –20°C до последующих анализов. Фильтрат для определения РОУ отбирался в стеклянные вials (22 мл), подкислялся до pH₂ и хранился при температуре +4°C. Определение концентраций РОУ, ВОУ и карбонатов производили на анализаторе Shimadzu TOC-Vcph с дополнительным модулем SSM-5000A (Беляев и др., 2010).

Концентрацию хлорофилла «а» и феофитина определяли флуориметрическим методом (Мошаров, 2010). Пробы воды (800 мл) сразу после отбора фильтровали через фильтры GF/F под вакуумом (0.2 атм.). Фильтры помещали в пробирки, заливали 90% раствором ацетона и хранили при температуре +4°C в темноте до проведения анализов. Определение флуоресценции экстракта выполняли флуориметром фирмы Turner Designs Instruments.

Результаты

Основные результаты измерений представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Геохимические параметры верхнего слоя вод Карского моря в феврале-марте 2017 г.

№ ст.	Дата	Координаты (ггмм,мм)		S	T	POY	Взвесь	BOY	Карб.	BOY/ Взвесь	Хлро- филл«а»	Феофи- тин	Хл«а»/ BOY	
		с.ш.	в.д.											psu
Западный р-н	1	28.02	70°30.66'	58°14.47'	–	–1.4	1.08	0.56	51.71	н/о	9.3	0.11	0.01	0.22
	18	10.03	70°52.7'	59°76.46'	31.8	–1.6	1.30	0.92	43.92	н/о	4.8	0.12	0.01	0.26
	3	28.02	71°17.5'	61°09.88'	31.0	–1.8	1.27	0.50	42.63	1.5	8.5	0.45	н/о	1.05
	14	10.03	71°20.38'	63°44.39'	29.8	–1.6	1.29	0.21	44.91	н/о	21.3	0.02	0.01	0.05
	6	28.02	71°33.77'	64°06.12'	32.6	–1.8	1.16	0.64	42.63	1.75	6.7	0.11	0.09	0.26
	8	28.02	72°03.68'	67°26.31'	29.3	–1.8	1.18	0.28	30.87	1.49	11.1	0.07	0.01	0.23
	Среднее значение по западному р-ну				30.9	–1.7	1.2	0.52	42.80	1.60	10.3	0.15	0.03	0.30
Траверз о. Белый	9	1.03	73°39.42'	70°16.69'	27.9	–1.9	1.41	1.78	70.74	н/о	4.0	0.04	0.05	0.06
	13	9.03	73°53.28'	71°48.55'	31.8	–1.9	1.51	0.46	82.04	н/о	17.9	0.05	0.07	0.06
Восточный р-н	10	1.03	73°49.04'	73°82.37'	30.7	–1.8	2.43	7.33	307.2	н/о	4.2	0.19	0.23	0.06
	11	1.03	73°18.29'	78°04.88'	28.2	–1.5	2.64	18.11	483.2	н/о	2.7	0.17	0.43	0.04
	12	1.03	72°42.03'	78°34.45'	16.3	–0.7	3.22	1.61	141.7	н/о	8.8	0.08	0.15	0.06
	Среднее значение по восточному р-ну				25.1	–1.3	2.8	9.0	310.7	-	5.2	0.15	0.27	0.05
Среднее значение				28.9	–1.6	1.7	2.9	122.0	1.6	9.0	0.13	0.11	0.21	
Медианное значение				30.3	–1.8	1.3	0.6	51.7	1.5	8.5	0.11	0.06	0.06	
Макс. значение				32.6	–0.7	3.2	18.11	483.2	1.75	21.3	0.45	0.43	1.05	
Мин. значение				16.3	–1.9	1.1	0.28	30.87	1.49	2.7	0.02	0.01	0.04	
Число станций				10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	

Соленость и температура. Учитывая способы отбора проб и измерения температуры воды можно отметить, что значения температуры по всем исследованным пробам достаточно однородны. Из всего массива повышенными значениями температуры выделяются 2 станции: ст. 1, расположенная в Карских воротах, и ст. 12 в устьевой зоне Енисея. На ст. 12 также зафиксировано минимальное значение солености (16.3 psu). В водах более низкой солености пробы воды отобрать не удалось в связи с тяжелой ледовой обстановкой. Наибольшая изменчивость солености поверхностных вод наблюдалась в зоне влияния речного стока (от о. Белый до устья Енисея), но распределение поверхностных вод прослеживалось слабо. Станций с соленостью вод меньше 27 psu в районе исследований не выявлено (кроме ст. 12). Наибольший градиент солености наблюдался между станциями 9 и 13 (27.9–31.8 psu).

POY. Распределение POY в поверхностном слое вод исследуемого района относительно однородно (1.1–3.2 мг/л, среднее 1.7 мг/л). При проведении ана-

лиза зависимости содержания РОУ от солености (Беляев и др., 2010, 2015; Stein et al., 2003) по всем исследованным пробам линейной зависимости не выявлено. Повышенное содержание РОУ выявлено на трех станциях восточного района (ст. 10, 11, 12 рис. 2А I).

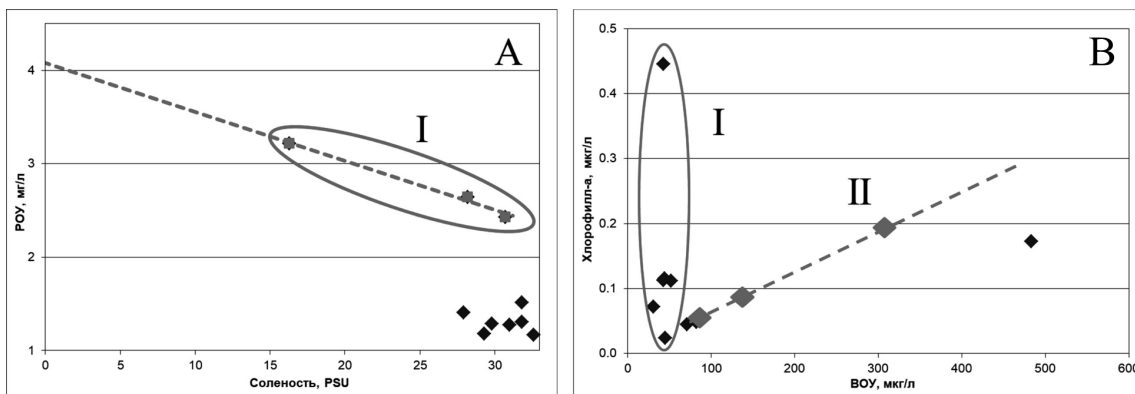


Рис. 2. Зависимость содержания РОУ от солености (А) I – линейная зависимость (повышенные концентрации РОУ) и отношение хлорофилл «а»/ВОУ (В) I – повышенные концентрации хлорофилла «а» относительно ВОУ, II – линейная зависимость.

Взвесь. Диапазон концентрации взвеси в поверхностных водах изменялся в широких пределах (0.28–18.11 мг/л, среднее 2.9 мг/л, табл. 1). При этом средние значения концентрации на станциях, расположенных западнее траверза о. Белый (рис. 1В, ст.1, 18, 3, 14, 6, 8) были существенно ниже – 0.52 мг/л, чем средние значения на станциях, расположенных восточнее – 9.0 мг/л (ст. 10, 11, 12). При этом по концентрациям взвеси среди исследованных проб резко выделяются ст. 10 и 11. На этих двух станциях концентрация взвеси более, чем в 10 раз превышала медианные значения. На ст. 12, расположенной ближе к устью Енисея, воды которой обладают существенно меньшей соленостью, содержание взвешенного вещества было существенно ниже.

ВОУ. Картина распределения ВОУ схожа с картиной распределения концентрации взвеси (30.87–483.2 мкг/л, среднее 122.0 мкг/л, табл. 1). В восточной части исследуемого района наблюдаются повышенные средние концентрации ВОУ, в западной – пониженные, при этом диапазон изменчивости концентраций ВОУ в западной части значительно меньше диапазона изменчивости концентраций взвеси. Необходимо отметить, что на ряде станций (ст. 3, 6, 8) отмечено присутствие карбонатов во взвеси, что является довольно редким явлением для акватории Карского моря (Беляев и др., 2010, 2015). Максимумы концентраций ВОУ совпадают с максимумами концентраций взвеси (ст. 10, 11 307.2 и 483.2 мкг/л соответственно), при этом разница в содержании ВОУ между этими станциями значительно меньше в сравнении с колебаниями концентраций самой взвеси.

ВОУ/Взвесь. Для восточной части исследуемого района относительное содержание ВОУ во взвеси ниже, чем для западной, при этом общая доля ВОУ во взвеси невелика и составляет 9% (табл. 1). Наибольшее содержание ВОУ во взвеси отмечено на ст. 14, расположенной на границе сплошных ледовых полей и битого льда

и ст. 13 – в зоне максимального градиента солености. Станции 10 и 11 характеризуются минимумами относительных концентраций ВОУ при аномально высоких концентрациях взвеси.

Хлорофилл «а». Во всем исследуемом районе наблюдались низкие концентрации хлорофилла «а», показывающие отсутствие активных фотосинтетических процессов и низкое содержание фитопланктона. При этом в восточной части концентрации феофитина в водорослях превышали концентрации хлорофилла «а». В западной части содержание феофитина ниже, чем хлорофилла «а». Единственная станция, на которой содержание хлорофилла «а» превосходило среднюю более, чем в три раза (ст.3–0.45 мкг/л) была расположена в западной части моря на границе мелкобитый лед – ледовые поля.

Хлорофилл «а»/ВОУ. Анализ отношения хлорофилл «а»/ВОУ позволил выявить три типа станций (рис. 2В). К первому типу относятся станции расположенные в западной части моря (ст. 1, 18, 3, 14, 6, 8). Для них характерны пониженные концентрации ВОУ, повышенные хлорофилла «а» и отсутствие зависимости между их концентрациями (рис. 2В I). Второй тип располагался в восточной части моря (ст. 9, 13, 10, 12). Для него характерно наличие линейной корреляции между содержанием ВОУ и концентрациями хлорофилла «а». (рис. 2В II, $R^2=0.99$). Выявленная зависимость может указывать на единый источник поступления взвеси в восточную часть исследуемого района. К третьему типу можно отнести ст. 11, относительное содержание хлорофилла «а» в водах которой минимально, несмотря на высокие концентрации взвеси.

Обсуждение

Как описано выше, материалы, представленные в настоящей работе, получены в сезон поздней зимы, ранее не охваченный исследованиями. Показано, что в период наблюдений концентрации исследуемых параметров ниже не только летних значений (Беляев и др., 2010, 2015; Мошаров и др., 2016), но и величин зафиксированных в начале весеннего периода (Сажин и др., 2017). Так, например, средние концентрации ВОУ в летне-осенний период для района исследований превышали наблюдаемые более чем в 2 раза, а в ранне-весенний в 1,5. В отличие от исследований 2016 года (ранне-весенний период) по комплексному анализу полученных данных представляется возможным выделить 2 хорошо различающихся района: западнее траверза о. Белый и восточнее, а также пограничную зону между ними. В ранне-весенний период провести такое разделение было невозможно (Сажин и др., 2017). При этом распреснение поверхностных вод в зимний сезон не может служить опорным параметром для проведения границы, так как может быть обусловлено не только поступлением в акваторию вод речного стока, но и локальным таянием льда.

Для восточного района даже в феврале-марте можно отметить существенное влияние речного стока, хотя и гораздо менее явно выраженное, чем в летний период. Это проявляется в относительно повышенных концентрациях РОУ, ВОУ,

взвеси и пониженных – хлорофилла «а». Относительно высокие значения феофитина, по сравнению с концентрациями хлорофилла «а», показывают существенную деградацию ОВ данного района. Для РОУ поверхностных вод данного района (рис 2А I) прослеживается линейный тренд зависимости от солености с расчетным содержанием РОУ в пресных водах порядка 4 мг/л, что сопоставимо со значениями, фиксировавшимися в 2016 году в пресных водах р. Енисей (Сажин и др., 2017). При этом концентрации РОУ вод восточного района существенно превосходят как концентрации РОУ вод западного района, так и средние концентрации РОУ для всего исследуемого района (Беляев 2010, 2015, Сажин 2017), что затрудняет анализ их генезиса и не позволяет однозначно утверждать, что они сформировались из-за смешения пресных и морских вод. Также в этом районе выделяются воды ст. 10 и 11, которые аномально обогащены взвесью, относительно обеднены ВОУ и хлорофиллом «а». Состав взвешенного вещества в водах данных станций может формироваться не только под влиянием вод речного стока, но и из-за процессов взмучивания поверхностного слоя донных осадков.

В западном районе концентрации взвеси, ВОУ и РОУ понижены относительно средних значений, при этом доля хлорофилла «а» в составе ВОУ существенно выше. Также регистрировалась повышенная доля ВОУ в составе взвеси. В пробах воды данного района отмечено присутствие карбонатов, не поставляемых с водами речного стока. Содержание в пробах хлорофилла «а» превышало содержание феофитина. Совокупность данных факторов позволяет предположить существенный вклад автохтонного материала в формирование состава взвеси.

Для всей исследованной акватории можно предположить существование двух фронтальных зон расположенных в районе границы речных и морских вод (ст. 9, 13) и границы мелкобитого и сплошного льда (ст. 3, 14). Несмотря на зимний период в этих районах наблюдаются наиболее высокие содержания ОВ в составе взвеси, а на границе битый–сплошной лед повышенное значение хлорофилла «а», что может говорить о поступлении новообразованного органического вещества в поверхностный слой вод в данных районах.

Авторы статьи выражают благодарность экипажу д/э «Норильский Никель» за содействие при выполнении судовых работ и компании «Норильский Никель» за возможность использовать ее флот для научных исследований, а также сотрудникам ММБИ РАН Ишкулову Д.Г, Дерябину А.А. и Болтенковой М.А. за помощь в подготовке и проведении экспедиции. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0005) при частичной поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00032, № 18-05-00326).

Литература

- Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М. Органическое вещество воды, взвеси и донных осадков центральной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 554. С. 563–576.

- Беляев Н.А., Поняев М.С., Пересыпкин В.И. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков Карского моря // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
- Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 264 с.
- Мошаров С.А., Демидов А.Б., Симакова У.В. Особенности процессов первичного продуцирования в Карском море в конце вегетационного периода // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 90–100.
- Мошаров С.А. Распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
- Сажин А.Ф., Мошаров С.А., Романова Н.Д., Беляев Н.А., Хлебонашев П.В., Павлова М.А., Дружкова Е.И., Флинт М.В., Копылов А.И., Заботкина Е.А., Ишкулов Д.Г., Макаревич П.Р., Пастернак А.Ф., Маккавеев П.Н., Дроздова А.Н. Планктонное сообщество Карского моря ранней весной // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 246–248.
- Флинт М.В. 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 677–682.
- Экосистема Карского моря новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. М.: АИР, 2015. 320 с.
- Siberian river run-off in the Kara Sea / Ed. R.Stein, K.Fahl, D.K. Futterer, E.M. Galimov and O.V. Stepanets // Elsevier Science. 2003a. 488 p.

BASE GEOCHEMICAL PARAMETERS OF THE SURFACE WATER LAYER SOUTHWESTERN KARA SEA IN THE WINTER SEASON

V.Y. Fedulov, N.A. Belyaev, A.V. Kolokolova, A.F. Sazhin

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy prospekt,
Moscow, 117997, Russia, e-mail: fedulov.vy@ocean.ru
Submitted 02.02.2018, accepted 26.04.2018*

The suspended matter (SM), dissolved (DOC) and particulate organic carbon (POC), chlorophyll «a» and pheophytin distributions in surface water layer of southwest Kara Sea are presented. The concentration values of the above parameters were first obtained for February-March, previously unaffected by the previous studies. It was established that the measured concentrations were significantly lower in the winter period than those observed earlier in the summer and spring seasons. According to the complex data analysis, two separate regions are clearly distinguished: to the west and east of the Belyy Island traverse. The eastern region is under the decisive influence of a river discharge, manifested in relatively high concentrations of suspended matter, DOC and POC and relatively low concentrations of chlorophyll «a». Concentrations of suspended matter, dissolved and suspended organic carbon are reduced relative to the mean values, while the share of chlorophyll «a» in the POC is much higher in the western region. An increased POC concentration in the suspended matter is also recorded. Also, in the samples of the western region, the presence of carbonates, not supplied with the river discharge, was noted. The combination of these factors makes it possible to suggest a significant contribution of the autochthonous material to the suspended matter composition. The high content POC and chlorophyll «a» in the suspended matter could mark the supply of newly formed organic matter to the surface layer of water on the border of broken ice – ice fields.

Keywords: Kara Sea, winter season, suspended matter, organic carbon, chlorophyll «a», surface water layer.

References

- Belyaev N.A., Ponyaev M.S., and Kiryutin A.M.* Organic carbon in water, particulate matter, and upper layer of bottom sediments of the central part of the Kara Sea, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 4, pp. 508–520.
- Belyaev N.A., Ponyaev M.S., and Peresyphkin V.I.* The organic carbon in the water, the particulate matter, and the upper layer of the bottom sediments of the west Kara Sea. *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 5, pp. 706–715.
- Ekosistema Karskogo morya, novye dannye ekspeditsionnykh issledovaniy, Materialy nauchnoi konferentsii (Ecosystem of the Kara Sea, new data from expeditionary research. Materials of the scientific conference), Moscow: APR, 2015, 320 p.
- Flint M.V.* Cruise 54th of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh in the Kara sea. *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 5, pp. 677–682.
- Kravchishina M.D.* *Vzveshennoe veshchestvo Belogo morya i ego granulometricheskii sostav* (Suspended particulate matter in the White Sea and its grain size distribution). Moscow: Nauchnyi mir, 2009, 264 p.
- Mosharov S.A., Demidov A.B., and Simakova U.V.* Peculiarities of the primary production process in the Kara Sea at the end of the vegetation season. *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 1, pp. 84–94.
- Mosharov S.A.* Distribution of the primary production and chlorophyll a in the Kara Sea in September of 2007. *Oceanology*, 2010, Vol.50, No. 6, pp. 884–892.
- Pasternak A.F., Makkaveev P.N., and Drozdova A.N.* The plankton community of the Kara Sea in early spring. *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 222–224.
- Romankevich E.A., and Vetrov A.A.* *Tsikl ugleroda v arkticheskikh moryakh Rossii* (Cycle of Carbon in the Russian Arctic Seas). Moscow: Nauka, 2001, 302 p.
- Sazhin A.F., Mosharov S.A., Romanova N.D., Belyaev N.A., Khlebopashev P.V., Pavlova M.A., Druzhkova E.I., Flint M.V., Kopylov A.I., Zobotkina E.A., Ishkulov D.G., Makarevich P.R., Pasternak A.F., Makkaveev P.N., and Drozdova A.N.* The plankton community of the Kara Sea in early spring. *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 222–224.
- Siberian river run-off in the Kara Sea, Ed. R.Stein, K.Fahl, D.K. Futterer , E.M. Galimov and O.V. Stepanets, Elsevier Science, 2003a, 488 p.