



Среда обитания водных биологических ресурсов

Вертикальное распределение хлорофилла *a* в западной части Карского моря в осенний период 2020 г.

О.В. Воробьева^{1,2}, К.К. Кивва², А.Б. Демидов³, Е.В. Еремеева³, А.А. Полухин³, В.А. Артемьев³, С.А. Щука³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (ФГБОУ ВО «МГУ»), Ленинские горы, д.1, с. 12, Москва, 119234

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ФГБУН «ИО РАН»), Нахимовский проспект, д.36, Москва, 117997

E-mail: olvorobieva@rambler.ru

Целью работы было исследование распределения хлорофилла *a* (Хл-*a*) в наиболее глубоких районах западной части Карского моря – Новоземельской впадине и в южной части жёлоба Святой Анны.

Используемые методы: в ходе 81 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре 2020 г. определяли концентрации Хл-*a*, основных биогенных элементов и значения температуры и солёности.

В результате показано, что концентрация Хл-*a* в верхнем 100-метровом слое варьировала от 0,01 до 1,37 мг/м³ с медианным значением 0,23 мг/м³. Максимальные концентрации Хл-*a* в Новоземельской впадине (0,39–1,18 мг/м³) наблюдались на глубинах 10–35 м, в жёлобе Св. Анны (0,25–1,37 мг/м³) – в верхнем 15-метровом слое. В вертикальном распределении Хл-*a* на большинстве станций был отмечен подповерхностный максимум хлорофилла (ПХМ), располагавшийся на глубинах 10–42 м, и лишь в южной части жёлоба Св. Анны максимальные концентрации Хл-*a* наблюдались в поверхностном горизонте. Наличие ПХМ зависело от речного стока – на станциях с высокой поверхностной солёностью, большой глубиной эвфотического слоя и низкой концентрацией Хл-*a* на поверхности наблюдался хорошо выраженный ПХМ. В районах, подверженных влиянию речного стока – с высоким содержанием кремния и небольшой глубиной эвфотического слоя, максимальные концентрации Хл-*a* были отмечены на поверхности. Доля феофитина *a* в эвфотическом слое варьировала от 18 до 73% (медианное значение 41%) с минимальными значениями в слое максимума Хл-*a*. Интегральное содержание Хл-*a* в эвфотическом слое колебалось от 5,75 до 24,54 мг/м² при медианном значении 9,51 мг/м². Наибольшие значения регистрировались при большой толщине эвфотического слоя и выраженном подповерхностном максимуме Хл-*a*.

Практическая значимость: полученные данные об особенностях вертикального распределения концентрации Хл-*a* позволяют расширить представления об условиях новообразования органического вещества и продуктивности Карского моря.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, Карское море, фитопланктон, феофитин *a*, подповерхностный максимум хлорофилла, Новоземельская впадина, жёлоб Св. Анны.

Vertical distribution of chlorophyll *a* in the western part of the Kara Sea in autumn 2020

Olga V. Vorobieva^{1,2}, Kirill K. Kivva², Andrey B. Demidov³, Elena V. Eremeeva³, Alexander A. Polukhin³, Vladimir A. Artemiev³, Sergey A. Shchuka³

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University («MSU»), 1–12, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), 19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

³ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS («IO RAS»), 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia

The aim of the work was to study the distribution of chlorophyll *a* (Chl-*a*) in the deepest part of the western Kara Sea – the Novaya Zemlya Trough and in St. Anna Trough.

Materials: field studies of Chl-*a*, macronutrients, dissolved oxygen and physical parameters were held in September 2020 during the 81st cruise of R/V «Akademik Mstislav Keldysh».

The results showed that Chl-*a* concentration within the upper 100 m layer ranged from 0.01 to 1.37 mg/m³ (median value of 0.23 mg/m³). The maximum concentrations of Chl-*a* in the Novaya Zemlya Trough (0.39–1.18 mg/m³) were observed at depths of 10–35 m, in the St. Anna Trough (0.25–1.37 mg/m³) – in the upper 15-meter layer. In the vertical distribution of Chl-*a* the subsurface chlorophyll maximum (SCM) was noted at depths of 10–42 m. In the southern part of the St. Anna Trough, the maximum concentrations of Chl-*a* were observed in the surface horizon. SCM existence depended on the runoff water distribution: well-pronounced SCM was observed at stations with high surface salinity which were characterized by a deeper euphotic depth, and a low concentration of Chl-*a* at the surface. In regions affected by river runoff, which had low salinity and high nutrient content in the upper layer as well as shallow depth of the photic layer, the maximum concentrations of Chl-*a* were observed at the surface. The share of pheophytin varied from 18 to 73% (median value of 41%) with minimum values in the layer of chlorophyll maximum. Integrated Chl-*a* concentration ranged from 5.75 to 24.54 mg/m² (median value of 9.51 mg/m²), the highest values were observed in regions with deeper euphotic layer and pronounced SCM.

Practical value: the data on the vertical distribution of Chl-*a* concentration allow to expand understanding of the conditions of organic matter formation and productivity of the Kara Sea.

Keywords: chlorophyll *a*, Kara Sea, phytoplankton, pheophytin *a*, subsurface chlorophyll maximum, Novaya Zemlya Trough, St. Anna Trough.

ВВЕДЕНИЕ

Микроводоросли являются важным звеном в трофических цепях водных сообществ. В пигментном составе выделяют хлорофиллы *a*, *b*, *c*, каротиноиды и фикобилины. Основную роль в фотосинтезе играет хлорофилл *a* (Хл-*a*), так как другие пигменты лишь передают поглощённую ими энергию. Концентрация Хл-*a* позволяет оценить биомассу и продукционные характеристики фитопланктона.

Из всех морей Российского сектора Арктики Карское море в наибольшей степени подвергается воздействию речного стока. Речной сток, обогащённый органическим веществом и минеральными формами биогенных элементов, при взаимодействии с морской водой формирует особую структуру вод моря, характеризующуюся высокой степенью вертикальной и горизонтальной неоднородности [Зацепин и др., 2010]. Акваторию Карского моря разделяют на районы с различными условиями протекания гидрофизических и биогеохимических процессов [Demidov et al., 2014]. На формирование водной массы большей части юго-запада Карского моря речной сток оказывает незначительное воздействие, по содержанию Хл-*a* на поверхности этот район относится к мезотрофным акваториям [Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977]. Для поверхностного слоя района жёлоба Св. Анны, находящегося под влиянием баренцевоморских и арктических вод, характерна солёность 30–32, низкое содержание растворённого кремния и мезотрофные воды с высокой прозрачностью [Пивоваров и др., 2003; Зацепин и др., 2010; Демидов и др., 2015]. Гидрологическая структура вод влияет и на вертикальное распределение Хл-*a* – в поверхностных водах с солёностью выше 20 на глубинах 8–40 м отмечался подповерхностный максимум хлорофилла (ПХМ), располагающийся обычно под слоем сезонного пикноклина. Для вод с солёностью 1–20 характерен поверхностный максимум Хл-*a* [Демидов, 2018].

Другой особенностью Карского моря является мелководный характер значительной части его акватории – около 64% площади дна имеют глубины менее 100 м и лишь 2% – более 500 м. Средние глубины моря и шельфа составляют ~ 110 [Carmack et al., 2006] и 56 м [Jakobsson et al., 2004], соответственно.

Пространственная неоднородность распределения гидролого-гидрофизических параметров в Карском море, обусловленная влиянием речного стока, вызывает особый интерес к исследованиям распределения Хл-*a* в районах Карского моря удалённых от крупных эстуариев. Цель данной работы заключается в выявлении особенностей распределения хлорофилла *a* в западной части моря на основе данных экспедиции 2020 года.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в ходе 81-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в период с 01 по 20 сентября 2020 г. [Флинт и др., 2021]. Определение содержания Хл-*a* и гидролого-гидрохимических параметров воды проходило на двух разрезах – «Новоземельская впадина» (станции 6883, 6902, 6903, 6911, 6912, 6913, 6916, 6926–6928) и «жёлоб Св. Анны» (станции 6879, 6881, 6883, 6884, 6886, 6887) (рис. 1). Температуру, солёность и концентрацию Хл-*a* измеряли CTD-зондом SBE911 Plus. Для лабораторного определения содержания Хл-*a* и гидрохимических параметров пробы воды отбирали пластиковыми батометрами зондирующего комплекса из верхнего 100-метрового слоя. От пяти до семи горизонтов отбора проб (включая поверхностный слой, слой максимума флуоресценции и слой 1%-ной освещённости фотосинтетически активной радиации (ФАР)) определяли на основании данных по температуре, солёности, флуоресценции и подводной облучённости в диапазоне ФАР в ходе гидрофизического зондирования. В полученных пробах измеряли концентрацию Хл-*a* и феофитина *a*, для чего пробы объёмом 500 мл фильтровали через стекловолокнистые фильтры марки GF/F под вакуумом при разряжении до 0,2 атм с использованием фильтровальной системы. Фильтры высушивали в темноте и определяли содержание Хл-*a* путём экстрагирования 90%-ным водным раствором ацетона в течение суток. Флуоресценцию полученных экстрактов измеряли на флуориметре до и после подкисления 1N HCl. Калибровку флуориметра проводили спектрофотометрическим методом с использованием химически чистого Хл-*a* (Sigma) в качестве стандарта. Расчёт концентрации Хл-*a* и феофитина *a* проводили с учётом объёма профильтрованной пробы, объёма экстрактов и калибровочных коэффициентов флуориметра по стандартным формулам.¹ Пробы для определения растворённого кислорода отбирали в калиброванные склянки. Пробы для определения биогенных элементов (фосфаты, силикаты, формы азота) – в пластиковую посуду 0,5 л без консервации. Определение гидрохимических параметров проводилось в соответствии со стандартными методиками [Руководство..., 2003] на борту судна сразу после отбора проб. Колориметрические определения выполнены на спектро-

¹ Arar E.J., Collins G.B. 1997. Method 445.0 In Vitro Determination of Chlorophyll *a* and Pheophytin *a* in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency. Washington. DC. 23 p.

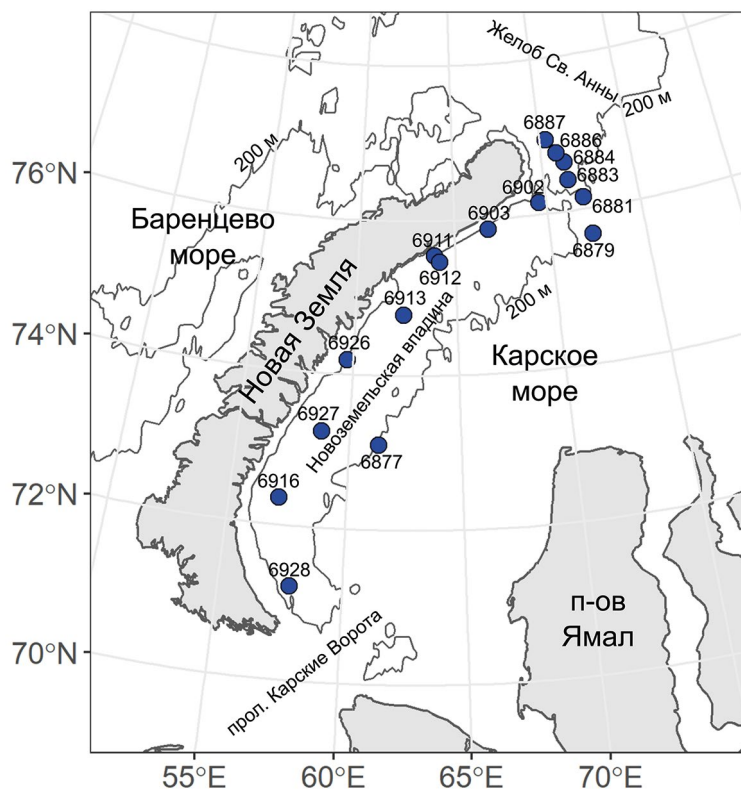


Рис. 1. Расположение станций в Карском море в 81 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 2020 г.)
Fig. 1. Location of stations in the Kara Sea during 81st cruise of the R/V «Akademik Mstislav Keldysh» (September 2020)

фотометре HACH Lange DR3900 (Германия). В качестве ориентировочного порогового значения концентрации минерального азота, ниже которой может наблюдаться ограничение фотосинтеза, использовали $0,9 \mu\text{M}$ [Egge, Aksnes, 1992; Fisher et al., 1992; Tremblay et al., 2006].

Для характеристики содержания азота при построении разрезов использовали концентрацию растворённого минерального азота (сумма концентрации аммонийного, нитритного и нитратного азота). Для расчёта кажущегося потребления кислорода (КПК, μM) использовали значения растворимости кислорода, полученные по формуле Вейса. Для характеристики вертикального распределения Хл-а относительно пикноклина использовали вертикальный градиент плотности. Пикноклин определили как слой значений градиента условной потенциальной плотности, превышающих перцентиль 0,95 всех значений градиента условной потенциальной плотности в слое 0–120 м. Дополнительно рассчитали нижнюю границу верхнего перемешанного слоя (ВПС) как горизонт, где условная потенциальная плотность превышала значение на поверхности на $0,1 \text{ кг/м}^3$ [Peralta-Ferriz, Woodgate, 2015]. На 12 из 17 станций верхняя граница пикноклина соответствовала нижней границе ВПС с точностью до 1 м. Только на двух станциях она располага-

лась глубже нижней границы ВПС на 3–4 м (станции 6879 и 6903). Поэтому на рисунках показано только расположение пикноклина.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Глубоководные станции, выполненные в ходе рейса, относились к двум районам Карского моря – Новоземельской впадине и южной части жёлоба Св. Анны. Эти районы имели различные гидролого-гидрохимические особенности и распределение Хл-а.

1. Разрез Новоземельский

Район Новоземельской впадины находится под влиянием холодной и солёной воды, поступающей с шельфа Новой Земли в периоды активного льдообразования, и опреснённой воды, связанной с обским и енисейским стоком [Зацепин и др., 2010]. Вдоль берега Новой Земли существует сильное Восточно-Новоземельское течение, направленное на северо-восток, которое с удалением от берега уходит под поверхность. Глубже 100 м на западном склоне впадины наблюдается противотечение, направленное на юго-запад [Розанов, 2015].

Станции, расположенные на разрезе «Новоземельский», имели глубину от 222 до 374 м, при ме-

дианном значении 285 м. Поверхностная солёность на разрезе колебалась в пределах от 29,71 до 32,77, температура на поверхности варьировала от +5,6 до +8,11 °С. Наименьшая солёность и наибольшая температура наблюдались в северо-восточной части разреза в поверхностном горизонте, где наблюдались также повышенные концентрации кремния (до 20,55 μM), что свидетельствует о влиянии речного стока.

В ВПС, граница которого располагалась на глубинах 5–20 м, содержание биогенных веществ было ниже уровней, лимитирующих фотосинтез (рис. 2, табл. 1).

Поверхностные и подповерхностные воды северо-восточной части разреза были более насыщены кислородом, чем воды юго-западной части. Отрицательные величины КПК, свидетельствующие о преобладании продукционных процессов над деструк-

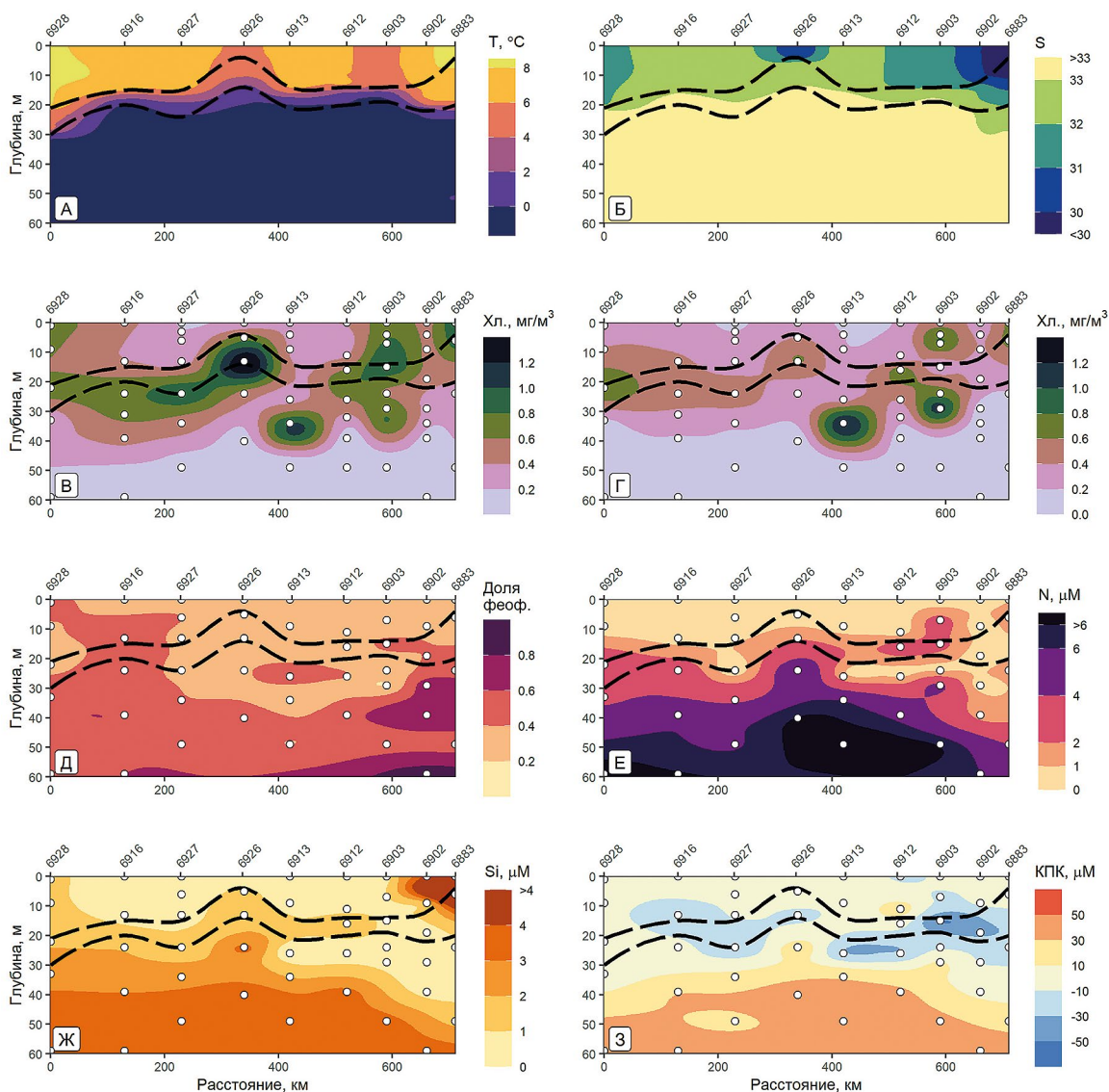


Рис. 2. Распределение температуры (А), солёности (Б), содержания хлорофилла *a* по данным зондирования (В) и лабораторным измерениям (Г), доли феофитина (Д), доли феофитина (Д), растворённого минерального азота (Е), растворённого минерального кремния (Ж) и кажущегося потребления кислорода (З) на разрезе «Новоземельский» в сентябре 2020 г. Белыми точками показаны горизонты отбора проб. Чёрными пунктирными линиями – верхняя и нижняя граница пикноклина. В верхней части рисунков отмечено расположение станций и их номера

Fig. 2. Distribution of temperature (А), salinity (Б), chlorophyll *a* concentration according to CTD-based fluorimeter (В) and laboratory measurements (Г), the proportion of pheophytin according to laboratory measurements (Д), the total concentration of nitrogen species (Е), dissolved silicates (Ж) and apparent oxygen consumption (З) at the Novaya Zemlya Trough in September 2020. The white dots show the sampling horizons. Black dotted lines represent the upper and lower bound of the pycnocline. The location of the stations and their numbers are marked in the upper part of the figures

Таблица 1. Гидролого-гидрохимические характеристики районов Карского моря в поверхностном слое в период исследования
Table 1. Hydrological and hydrochemical characteristics of the Kara Sea surface layer during the study period

Район	h, м	T, °C	S	КПК, µM	PO ₄ , µM	Si, µM	NO ₃ , µM	NO ₂ , µM	NH ₄ , µM
НВ	222–374	-1,64–8,12	29,71–34,41	-27,3–62,9	0,06–0,14	0,25–20,55	0,01–0,13	0–0,04	0,05–0,84
	285	-0,45	33,42	0,2	0,10	0,78	0,07	0,01	0,32
ЖА	164–527	-0,95–9,26	14,91–34,79	-20,2–61,1	0,01–0,21	0,18–39,21	0,08–0,26	0,00–0,05	0,18–0,84
	207	3,80	34,16	0,3	0,09	10,58	0,11	0,01	0,33
КМ	277	0,57	33,55	0,7	0,10	0,65	0,09	0,01	0,32

НВ – Новоземельская впадина; ЖА – жёлоб Св. Анны; КМ – усреднённые данные по исследованным районам Карского моря. h – глубина, м; T – температура, °C; S – солёность; КПК – кажущееся потребление кислорода, µM; PO₄, Si, NO₃, NO₂, NH₄ – содержание фосфатов, кремния, нитратного, нитритного и аммонийного азота в поверхностном горизонте, µM. Вверху каждой ячейки дан разброс значений, внизу – среднее.

НВ – Novaya Zemlya Trough; ЖА – St. Anna Trough; КМ – averaged data for the studied areas of the Kara Sea. h – depth, m; T – temperature, °C; S – salinity; КПК is the apparent oxygen utilization, µM; PO₄, Si, NO₃, NO₂, NH₄ are the concentration of phosphates, silicates, nitrates, nitrites, and ammonium nitrogen, µM.

ционными, были отмечены в подповерхностных слоях. В северо-восточной части разреза минимальные значения (до -20,8 µM) наблюдались в слое скачка гидрофизических параметров, в центральной части (до -26,0 µM) ниже слоя скачка, в юго-западной части (до -27,3 µM) над слоем скачка. В целом, минимальные значения КПК располагались в зонах максимальной концентрации Хл-а. Максимум КПК располагался на глубинах ниже 40–50 м как в северо-восточной, так и в юго-западной части разреза.

Концентрация Хл-а на поверхности изменялась в пределах 0,18–0,63 мг/м³ при медианном значении 0,26 мг/м³. Наибольшие значения Хл-а на поверхности были приурочены к северо-восточной части разреза, где было отмечено влияние речного стока. В вертикальном распределении Хл-а были отмечены подповерхностные максимумы, которые определяли по соотношению максимальной концентрации Хл-а (Chl_{max}) к концентрации Хл-а на поверхности (Chl_{surf}). Хорошо выраженные подповерхностные максимумы при Chl_{max}/Chl_{surf} > 1,15 [Uitz, 2006] были расположены на глубинах 10–35 м (медиана 23 м). На большинстве станций в слое максимума Хл-а концентрации растворённого минерального азота были выше 0,9 µM, что позволяет говорить об отсутствии азотного голодания [Egge, Aksnes, 1992; Fisher et al., 1992; Tremblay et al., 2006]. Глубина эвфотического слоя, определённая как горизонт с освещённостью 1% от подповерхностной ФАР, колебалась в пределах 22–35 м, при медианном значении 26 м. На большинстве станций максимальные концентрации Хл-а наблюдались на нижней границе эвфотической зоны. Интегральное содержание Хл-а в эвфотическом слое колебалось незначительно, в пределах 8,55–14,48 мг/м² при медианном значении 9,94 мг/м².

Для характеристики состояния фитопланктонного сообщества важным показателем является содержа-

ние феофитина – первичного продукта распада хлорофилла. Феофитин – более стойкое, по сравнению с хлорофиллом, соединение, присутствующее во всех пробах морской воды. По мере старения сообщества водорослей в клетках водорослей происходит накопление феофитина. Доля феофитина в общей сумме пигментов хлорофилл + феофитин может служить показателем активности альгосообщества и способности воспринимать солнечную энергию и обеспечивать фотосинтез. Для активной фазы развития сообщества фитопланктона и высокой продукционной активности характерно содержание феофитина меньше 40%, при содержании феофитина от 40 до 65% фитопланктон находится в угнетённом состоянии с пониженной физиологической активностью, а при доле феофитина выше 65% клетки водорослей не обладают нужным для фотосинтеза потенциалом и отмирают [Мошаров, Сергеева, 2018]. Доля феофитина, характеризующая активную фазу развития фитопланктона, наблюдалась в верхних горизонтах до 27 м с минимальными значениями в слое максимума Хл-а. В центральной части разреза наблюдались более продуктивные сообщества фитопланктона. Наиболее угнетённое состояние фитопланктона наблюдалось в северо-восточной части – так, на станции 6902 доля феофитина больше 65% наблюдалась уже на горизонте 30 м, тогда как на других станциях разреза пониженная физиологическая активность наблюдалась на горизонтах 70–100 м.

2. Разрез «жёлоб Св. Анны»

Жёлоб Св. Анны соединяет шельф Карского моря с глубоководными районами Северного Ледовитого океана, что приводит к взаимодействию шельфовых вод, вод Арктического бассейна и трансформированных атлантических вод [Зацепин и др., 2007]. В исследуемой части жёлоба выявлено контурное течение,

Таблица 2. Концентрации хлорофилла *a* и феофитина и глубина фотического слоя в районах Карского моря
Table 2. Concentrations of chlorophyll *a* and pheophytin and the depth of the photic layer in the areas of the Kara Sea

Район	Chl_surf, мг/м ³	Phae_surf, %	Chl_max, мг/м ³	Phae_max, %	Chl_max/ Chl_surf	Chl_int, мг/м ²	Ze, м
НВ	0,18–0,50	28–41	0,39–1,18	21,43–50,07	1,28–6,65	8,55–14,48	22–35
	0,24	37	0,61	34,37	2,14	9,94	26
ЖА	0,14–1,37	28–41	0,25–1,37	17,50–61,39	1–2,59	6,35–24,54	11–51
	0,51	33	0,71	30,92	1,10	8,27	17
КМ	0,30	34	0,66	33,29	1,90	9,51	25

НВ – Новоземельская впадина; ЖА – жёлоб Св. Анны; КМ – усреднённые данные по исследованным районам Карского моря. Chl_surf – концентрация хлорофилла *a* в поверхностном горизонте, мг/м³; Phae_surf – доля феофитина в сумме хлорофилл+феофитин в поверхностном горизонте, %; Chl_max – максимальная концентрация хлорофилла *a*, мг/м³; Phae_max – доля феофитина в сумме хлорофилл+феофитин в слое максимальной концентрации хлорофилла, %; Chl_max/Chl_surf – соотношению максимальной концентрации хлорофилла к концентрации хлорофилла на поверхности; Chl_int – интегральное содержание хлорофилла *a* в слое фотосинтеза, мг/м²; Ze – глубина эвфотического слоя (1% ФАР), м. Вверху каждой ячейки дан разброс значений, внизу – среднее.

НВ – Novaya Zemlya Trough; ЖА – St. Anna Trough; КМ – averaged data for the studied areas of the Kara Sea. Chl_surf – concentration of chlorophyll *a* in the surface horizon, mg/m³; Phae_surf – share of pheophytin in the sum of chlorophyll + pheophytin in the surface horizon, %; Chl_max – maximum concentration of chlorophyll *a*, mg/m³; Phae_max – share of pheophytin in the sum of chlorophyll + pheophytin in the layer of maximum chlorophyll concentration, %; Chl_max/Chl_surf – the ratio of the maximum concentration of chlorophyll to the concentration of chlorophyll on the surface; Chl_int – integral concentration of chlorophyll *a* in the photosynthesis layer, mg/m²; Ze – depth of the euphotic layer (1% PAR), m. Values at the top of each cell show the range, and value at the bottom represents the mean.

которое формирует склоновую фронтальную зону, ограничивающую распространение опреснённых вод на север [Флинт и др., 2021].

Выделяют 4 зоны с характерными гидрофизическими особенностями: I – шельф, прилежащий к жёлобу Св. Анны с опреснённым верхним слоем, II – бровка шельфа с хорошо выраженной фронтальной областью; III – верхняя часть склона жёлоба Св. Анны, в которой под верхним прогретым слоем находился слой воды с пониженной температурой и повышенной солёностью и IV – нижняя часть склона жёлоба, характеризующаяся наличием вод атлантического происхождения [Сергеева и др., 2016].

Глубина станций на разрезе варьировала от 164 м на юге до 527 м на севере. Медианная глубина при этом составляла 207 м. Южная часть разреза вплоть до станции 6883 (76,401° с.ш., 71,338° в.д.) была подвержена влиянию речного стока, что проявлялось в пониженной поверхностной солёности (14,91–24,73), повышенной температуре на поверхности (от +8,45 до +9,26 °С) и высоких значениях растворённого кремния (до 39,21 µМ). Северная часть разреза характеризовалась поверхностной солёностью 33,65–34,34, температурой от +5,39 до +5,8 °С и содержанием кремния на поверхности 0,18–0,61 µМ. Мощность ВПС в районе влияния речного стока составляла до 10 м, увеличиваясь к северной части до 20 м (рис. 3). Верхний перемешанный слой был обеднён биогенными элементами – значения фосфатов и кремния (за исключением части, подверженной речному стоку) выше лимитирующих концентраций были отмечены на глубинах ниже 60 м, значения рас-

творённого минерального азота выше 0,9 µМ отмечались на глубинах больше 40 м. Воды северной части разреза были более насыщены кислородом, чем воды южной части. Минимальные величины КПК (до –20,00 µМ) были отмечены в подповерхностных и поверхностных водах северной части разреза. Увеличение КПК было отмечено на глубинах больше 50 м. Слой отрицательных значений КПК, свидетельствующих о преобладании продукции над разложением органического вещества, расположен на глубине 20–50 м как в северной, так и в южной части разреза. Увеличение концентраций форм азота и фосфора наблюдалось в слоях ниже кислородного максимума. В центральной части разреза наблюдалась высокоградиентная фронтальная зона, ограниченная с севера почти вертикальной стеной более холодных вод. Часть разреза к югу от фронтальной зоны характеризовалась максимальными концентрациями Хл-*a* на поверхности и отсутствием ПХМ. Северная часть разреза отличалась заглублением слоя максимума Хл-*a* и наличием двух слоёв отрицательных значений КПК на горизонтах 12 и 41 м.

Концентрация Хл-*a* в поверхностном горизонте изменялась в пределах 0,14–1,37 мг/м³, при медианном значении 0,51 мг/м³ (табл. 2). Наибольшие концентрации были отмечены в южной части разреза, закономерно снижаясь к северу. В вертикальном распределении Хл-*a* в районе, подверженном влиянию речного стока, максимальные значения были отмечены в поверхностном слое. С продвижением на север (начиная со станции 6884, 76,633° с.ш., 71,252° в.д.) слой максимума Хл-*a* смещался под поверхность, то есть наблюдался ПХМ, причём, он опускался с 10 м

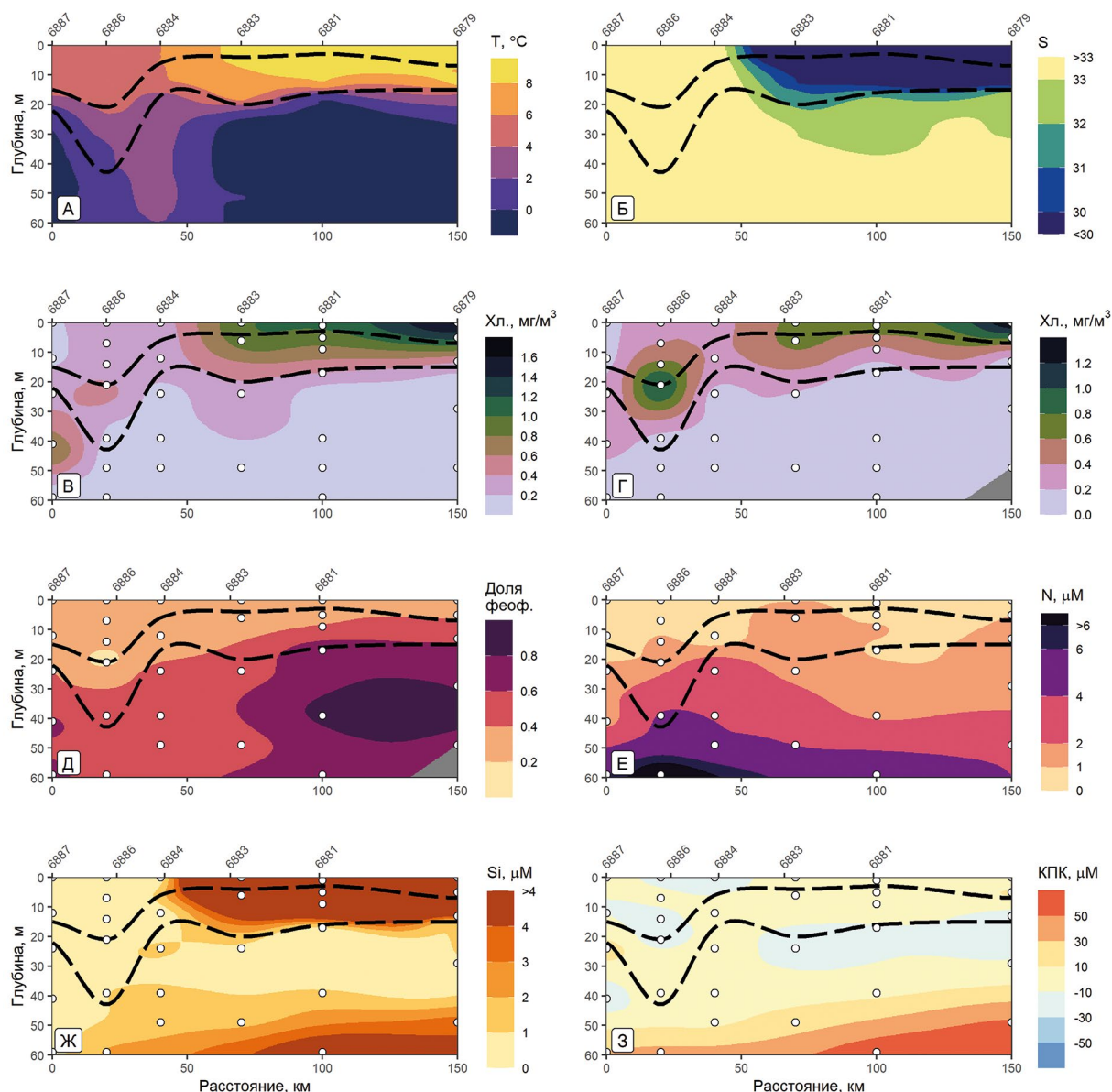


Рис. 3. Распределение температуры (А), солёности (Б), содержания хлорофилла *a* по данным зондирования (В) и лабораторным измерениям (Г), доли феофитина (Д), растворённого минерального азота (Е), растворённого кремния (Ж) и кажущегося потребления кислорода (З) на разрезе «жёлоб Св. Анны» в сентябре 2020 г. Белыми точками показаны горизонты отбора проб. Чёрными пунктирными линиями – верхняя и нижняя граница пикноклина. В верхней части рисунков отмечено расположение станций и их номера

Fig. 3. Distribution of temperature (A), salinity (Б), chlorophyll *a* concentration according to CTD-based fluorimeter (B) and laboratory measurements (Г), the proportion of pheophytin according to laboratory measurements (Д), the total concentration of nitrogen species (E), dissolved silicates (Ж) and apparent oxygen consumption (З) at the St. Anne Trough in September 2020. The white dots show the sampling horizons. Black dotted lines represent the upper and lower bound of the pycnocline. The location of the stations and their numbers are marked in the upper part of the figures

до 42 м. Максимальные значения Хл-*a* на станциях колебались в диапазоне 0,25–1,37 мг/м³ (медиана 0,71 мг/м³). Концентрации азота и фосфора в слое максимума Хл-*a* на большинстве станций были ниже значений, лимитирующих фотосинтез. Исключение составила самая северная станция 6887, где сумма нитратного и нитритного азота составила 1,0 µM.

Глубина слоя фотосинтеза на разрезе увеличивалась с 11 м на юге до 51 м на севере, при медианной глубине 17 м. Интегральное содержание Хл-*a* в слое ФАР при этом изменялось от 6,35 до 24,54 мг/м² при медианном значении 8,27 мг/м². Наибольшее содержание Хл-*a* наблюдалось на северной станции 6886, где был обнаружен выраженный максимум Хл-*a*.

Фотосинтетически активное сообщество фитопланктона наблюдалось в северной части разреза. Глубина слоя, в котором находилось сообщество фитопланктона с долей феофитина до 40%, увеличивалась с 6 м на юге до 25 м на севере. На юге же были отмечены сообщества фитопланктона, находящиеся в угнетённом состоянии на глубинах начиная с 18 м.

В ходе исследования были проведены сравнения между значениями Хл-*a*, оценёнными с помощью флуориметра *in situ*, и значениями, измеренными в лабораторных условиях после фильтрации и экстракции проб воды. В предыдущих исследованиях показано, что при измерениях флуориметром зондирующего комплекса в светлое время суток в верхних горизонтах может наблюдаться занижение измеренных значений флуоресценции, связанное с процессом тушения флуоресценции [Моисеева и др., 2020]. Однако в ходе данного исследования в большинстве случаев флуориметр зондирующего комплекса давал завышенные значения Хл-*a* по сравнению с измеренными в лаборатории. При этом завышение чаще всего составляло до 0,3 мг/м³ (перцентили 0,1 и 0,9 разности составили –0,28 и 0,05 мг/м³). Однако в пяти случаях разность значений превышала 0,5 мг/м³. При этом измеренная концентрация Хл-*a* составляла 0,31–1,00 мг/м³, то есть ошибка флуориметра зонда была более 50%. На Новоземельском разрезе максимальное завышение Хл-*a* флуориметром зонда (выше 0,5 мг/м³) наблюдалось на станциях 6903, 6926 и 6927 в районе пикноклина. На разрезе «жёлоб Св. Анны» – на станциях 6876 и 6877 (северо-западная часть разреза) также вблизи пикноклина. Поэтому, несмотря на очевидную важность использования данных зондирования водной толщи с измерением флуоресценции *in situ* для определения горизонтов отбора проб на биологические и гидрохимические параметры, полученные результаты указывают на необходимость параллельного лабораторного определения концентрации Хл-*a* в этих пробах.

Концентрация Хл-*a* на поверхности положительно коррелировала с концентрацией кремния в поверхностном горизонте (коэффициент ранговой корреляции Спирмена $r_s = 0,828$) и отрицательно коррелировала с солёностью и глубиной эвфотического слоя ($r_s = -0,62$ и $r_s = -0,73$). Степень выраженности ПХМ находилась в обратной зависимости от концентрации Хл-*a* на поверхности ($r_s = -0,62$) и в прямой зависимости от глубины станции и эвфотического слоя ($r_s = 0,70$ и $0,71$, соответственно). Интегральное содержание Хл-*a* в эвфотическом слое зависело от глубины слоя ФАР, выраженности ПХМ, глубины станции

и максимальной концентрации Хл-*a* ($r_s = 0,56, 0,61, 0,56$ и $0,52$, соответственно).

В прошлых исследованиях, проведённых в летний период, был отмечен хорошо выраженный ПХМ, главным образом, в юго-западной части Карского моря, в районах, не подверженных интенсивному влиянию речного стока, с солёностью на поверхности >25 [Демидов и др., 2021]. В осенний период максимальные концентрации Хл-*a* были отмечены на поверхности или в приповерхностном слое, ПХМ был выражен слабо и в основном наблюдался при концентрации Хл-*a* на поверхности от 0,1 до 0,5 мг/м³ [Мошаров, 2010; Демидов и др., 2015]. В наших исследованиях наблюдался хорошо выраженный ПХМ в районах, не подверженных влиянию речного стока с низкими концентрациями кремния и Хл-*a* на поверхности (0,14–0,50 мг/м³) и большой глубиной эвфотического слоя (20–51 м). Расположение ПХМ соответствовало общему правилу для всего Мирового океана – вблизи горизонта 1% ФАР и верхней границы нутриклина [Cullen et al., 2015].

В исследованной южной части жёлоба Св. Анны наблюдалась фронтальная зона, разграничивавшая более тёплые воды с низкой солёностью и более холодные воды с высокой солёностью. Эта фронтальная зона оказала влияние на распределение Хл-*a*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вертикальное распределение Хл-*a* в западных районах Карского моря в сентябре 2020 г. определялось воздействием речного стока. На станциях, находящихся под влиянием опреснённых вод, отсутствовал ПХМ и наблюдались повышенные (> 1 мг/м³) величины Хл-*a* на поверхности. В целом, физиологическое состояние альгосообществ в эвфотическом слое в сентябре, оценённое по доле феофитина, соответствовало активному состоянию клеток планктонных микроводорослей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при подготовке данной статьи.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа проведена в рамках соглашения о намерениях по сотрудничеству в научно-исследовательской деятельности между ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (ФГБНУ «ВНИРО») и ФГБУН «Инсти-

тут океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук» (ИО РАН) от 07.08.2018 г при финансовой поддержке Государственного задания FMWE-2021–0007.

ЛИТЕРАТУРА

- Демидов А.Б. 2018. Первичная продукция Карского моря: особенности формирования, оценка и долговременная изменчивость. Автореф. дисс. ... док. биол. наук. М.: Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 47с.
- Демидов А.Б., Гагарин В.И., Еремеева Е.В., Артемьев В.А., Полухин А.А., Шука С.А., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Флинт М.В. 2021. Вертикальная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в Карском море в середине лета: вклад поверхностных максимумов в интегральные величины // *Океанология*. Т. 61. № 5. С. 737–752.
- Демидов А.Б., Мошаров С.А. 2015. Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море // *Океанология*. Т. 55. № 4. С. 577–591.
- Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярко С.Г., Соловьёв Д.М. 2010. Поверхностный опреснённый слой в Карском море // *Океанология*. Т. 50. № 5. С. 698–708.
- Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т., Демидов А.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Поярко С.Г., Соловьёв Д.М. 2010. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г. // *Океанология*. Т. 50. № 5. С. 683–697.
- Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И. 1977. Первичная продукция // *Биология океана*. Т. 2: Биологическая продуктивность океана. М.: Наука. С. 183–209.
- Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Маторин Д.Н. 2020. Коррекция тушения флуоресценции хлорофилла а в верхнем перемешанном слое моря: разработка алгоритма // *Морской гидрофизический журнал*. Т. 36(1). С. 66–74. DOI 10.22449/0233–7584–2020–1–66–74
- Мошаров С.А. 2010. Распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море в сентябре 2007 г // *Океанология*. Т. 50. № 6. С. 933–941.
- Мошаров С.А., Сергеева В.М. 2018. Оценка функционального состояния морского фитопланктона по флуоресцентным показателям и соотношению концентраций феофитина и хлорофилла «а» // *Вопросы современной альгологии*. 2018. № 1 (16).
- Розанов А.Г. 2015. Геохимические особенности глубоководных донных отложений Карского моря (Новоземельская впадина, жёлоб Святой Анны) // *Океанология*. Т. 55. № 4. С. 709–722.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. 2003. / Сапожников В.В. ред. М.: Изд-во ВНИРО. 202 с.
- Сергеева В.М., Суханова И.Н., Дружкова Е.И., Мошаров С.А., Кременецкий В.В., Полухин А.А. 2016. Структура и распределение фитопланктона в глубоководных районах северной части Карского моря // *Океанология*. Т. 56. № 1. С. 113–119.
- Флинт М.В., Поярко С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю. 2021. Экосистемы морей сибирской Арктики – 2020: Карское море (81-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. Т. 61. № 2. С. 330–335.
- Carmack E.C., Barber D., Christensen J., Macdonald R., Rudels B., Sakshaug E. 2006. Climate variability and physical forcing of the food webs and the carbon budget on panarctic shelves // *Progress in Oceanography* V. 71. № 2–4. P. 145–181.
- Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaveev P.N. 2014. Patterns of the Kara Sea primary production in autumn: Biotic and abiotic forcing of subsurface layer // *J. of Marine Systems*. V. 132 P. 130–149. DOI 10.1016/j.jmarsys.2014.01.014.
- Edge J.K., Aksnes D.L. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition // *Marine Ecology Progress Series*. V. 83. P. 281–289.
- Fisher T.R., Peele E.R., Ammerman J.W., Harding L.W.J. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay // *Marine Ecology Progress Series* V. 82. P. 51–63.
- Jakobsson M., Grantz A., Kristoffersen Y., Macnab R. 2004. Bathymetry and physiography of the Arctic Ocean and its constituent seas // *The organic carbon cycle in the Arctic ocean*. / Stein R., Macdonald R.W. eds. Berlin. Springer-Verlag P. 1–6.
- Peralta-Ferriz C., Woodgate R.A. 2015. Seasonal and interannual variability of pan-Arctic surface mixed layer properties from 1979 to 2012 from hydrographic data, and the dominance of stratification for multiyear mixed layer depth shoaling // *Progress in Oceanography*. V.134. P. 19–53.
- Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A. 2003. River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea // *Siberian river run-off in the Kara Sea* / Stein R. ed. Amsterdam: Elsevier. P. 9–25.
- Tremblay J.-É., Michel C., Hobson K.A. 2006. Bloom dynamics in early opening waters of the Arctic Ocean // *Limnology and Oceanography*. V. 51. № 2. P. 900–912.
- Uitz J., Claustre H., Morel A., Hooker S.B. 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment on surface chlorophyll // *J. of Geophysical Research*. V. 111. C08005.

REFERENCES

- Demidov A.B. 2018. Primary production of the Kara Sea: features of formation, assessment and long-term variability. Thes. dissertation of Doctor Biological Sciences. Moscow: Shirshov Inst. of Oceanology of RAS. 47 p. (in Russ.)
- Demidov A.B., Gagarin V.I., Eremeeva E.V., Artemiev V.A., Polukhin A.A., Shchuka S.A., Grigoriev A.V., Khrapko A.N., Flint M.V. 2021. Vertical variability of primary production and chlorophyll a in the Kara sea in the middle of summer: contribution of subsurface maxima to the water column values // *Oceanology*. Т. 61. № 5. С. 645–661.
- Demidov A.B., Mosharov S.A. 2015. Vertical distribution of primary production and chlorophyll a in the Kara Sea // *Oceanology*. V. 55. P. 521–534. DOI 10.1134/S0001437015040025
- Zatsepin A.G., Zavalov P.O., Kremenetskiy V.V., Poyarkov S.G., Soloviev D.M. 2010. The upper desalinated layer in the Kara Sea // *Oceanology*. V. 50. P. 657–667

- Zatsepin A. G., Morozov E. G., Paka V. T., Demidov A. N., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Kremenetskiy V. V., Poyarkov S. G., Soloviev D. M. 2007. Circulation in the southwestern part of the Kara Sea in September // *Oceanology*. V. 50. P. 643–656. DOI 10.1134/S0001437010050024.
- Koblentz-Mishke O. I., Vedernikov V. I. 1977. Primary production // *Biology of the ocean*. Moscow: Nauka. V. 2: Biological productivity of the ocean. P. 183–209. (in Russ.)
- Moiseeva N. A., Churilova T. Y., Efimova T. V., Matorin D. N. 2020. Correction of the Chlorophyll a Fluorescence Quenching in the Sea Upper Mixed Layer: Development of the Algorithm // *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. V. 36 (1). P. 66–74. DOI 10.22449/0233–7584–2020–1–66–74. (In Russ.)
- Mosharov S. A. 2010. Distribution of the primary production and chlorophyll a in the Kara sea in September of 2007 // *Oceanology*. V. 50. № 6. P. 884–892.
- Mosharov S. A., Sergeeva V. M. 2018. Assessment of the functional state of marine phytoplankton by fluorescent indicators and the ratio of concentrations of pheophytin and chlorophyll «a» // *Questions of modern algology*. 2018. № 1 (16). (in Russ.)
- Rozanov A. G. 2015. Geochemical features of the deepwater sediments of the Kara sea (Novaya Zemlya Basin and St. Anna Trench) // *Oceanology*. Vol. 55. № 4. P. 644–656.
- Guidelines for chemical analysis of marine and fresh waters in environmental monitoring of fishery reservoirs and areas of the World Ocean promising for fishing*. 2003. / Sapozhnikov V. V. ed. Moscow: VNIRO Publish. 202 p. (in Russ.)
- Sergeeva V. M., Sukhanova I. N., Mosharov S. A., Kremenetskiy V. V., Poluhin A. A., Druzhkova E. I. 2016. The structure and distribution of the phytoplankton community in the deep region of the northern Kara sea // *Oceanology*. V. 56. № 1. P. 107–113.
- Flint M. V., Poyarkov S. G., Rimsky-Korsakov N. A., Miroshnikov A. Y. 2021. Ecosystems of siberian arctic seas-2020: the Kara sea (cruise 81 of the r/v «Akademik Mstislav Keldysh») // *Oceanology*. V. 61. № 2. P. 292–294.
- Carmack E. C., Barber D., Christensen J., Macdonald R., Rudels B., Sakshaug E. 2006. Climate variability and physical forcing of the food webs and the carbon budget on panarctic shelves // *Progress in Oceanography*. V. 71. № 2–4. P. 145–181.
- Demidov A. B., Mosharov S. A., Makkaveev P. N. 2014. Patterns of the Kara Sea primary production in autumn: Biotic and abiotic forcing of subsurface layer // *J. of Marine Systems*. V. 132. P. 130–149. DOI 10.1016/j.jmarsys.2014.01.014.
- Egge J. K., Aksnes D. L. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition // *Marine Ecology Progress Series*. V. 83. P. 281–289.
- Fisher T. R., Peele E. R., Ammerman J. W., Harding L. W. J. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay // *Marine Ecology Progress Series*. V. 82. P. 51–63.
- Jakobsson M., Grantz A., Kristoffersen Y., Macnab R. 2004. Bathymetry and physiography of the Arctic Ocean and its constituent seas // *The organic carbon cycle in the Arctic ocean*. / Stein R., Macdonald R. W. eds. Berlin. Springer-Verlag P. 1–6.
- Peralta-Ferriz C., Woodgate R. A. 2015. Seasonal and interannual variability of pan-Arctic surface mixed layer properties from 1979 to 2012 from hydrographic data, and the dominance of stratification for multiyear mixed layer depth shoaling // *Progress in Oceanography*. V. 134. P. 19–53.
- Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A. 2003. River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea // *Siberian river run-off in the Kara Sea* / Stein R. ed. Amsterdam: Elsevier. P. 9–25.
- Tremblay J.-É., Michel C., Hobson K. A. 2006. Bloom dynamics in early opening waters of the Arctic Ocean // *Limnology and Oceanography*. V. 51. № 2. P. 900–912.
- Uitz J., Claustre H., Morel A., Hooker S. B. 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment on surface chlorophyll // *J. of Geophysical Research*. V. 111. C08005.

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

Принята после рецензии 28.06.2023 г.