

УДК 581.132:574.583

ОЦЕНКА ГОДОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2018 г. А. Б. Демидов, С. В. Шеберстов, В. И. Гагарин

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

e-mail: demspa@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.10.2016 г.

Оценка первичной продукции фитопланктона, ледовой и подледной флоры Карского моря и его районов проведена с использованием региональных моделей и спутниковых данных MODIS-Aqua за период 2002–2015 гг. Среднегодовая первичная продукция фитопланктона, рассчитанная для вегетационного сезона (апрель–октябрь), равна 165 мгС/м^2 в день. Годовая первичная продукция фитопланктона составила 35 гС/м^2 . Годовая первичная продукция фитопланктона всей акватории Карского моря – $13 \times 10^{12} \text{ гС}$. Годовая продукция ледовой и подледной флоры, рассчитанная по динамике ледового покрова и литературным данным с использованием интегрированной биофизической модели – $1.7 \times 10^{12} \text{ гС}$, что составляет 12% от суммарной первичной продукции Карского моря. Произведено сравнение с предыдущими оценками первичной продукции Карского моря. Обсуждается уровень повышения продуктивности моря в условиях потепления Арктики и сокращения площади ледового покрова.

DOI: 10.7868/S003015741803005X

ВВЕДЕНИЕ

Величина годовой первичной продукции водоема является одной из основных характеристик экосистем различного масштаба, от моря до Мирового океана (здесь и далее использование термина “первичная продукция” (ПП) подразумевает величину интегральной для столба воды первичной продукции). Эта величина служит отправной точкой расчетов потоков вещества и энергии в пищевых цепях [4, 51, 59, 65, 70], выноса органики из верхних слоев океана и захоронения его на дне [1, 11, 41, 74], а также обмена углекислого газа между атмосферой и океаном [36, 84]. Долговременные изменения годовых величин первичной продукции являются одним из показателей изменчивости климата на планете [21, 23, 27, 40, 72, 80].

Происходящие в последние десятилетия глобальные климатические изменения оказывают особенно сильное воздействие на экосистемы Арктики [19, 24, 50, 81, 82, 85, 86]. Повышение температуры [60, 68, 69, 75], сокращение площади и толщины ледового покрова [18, 26, 28, 30, 53, 56, 76–78, 87] и связанные с ними вариации параметров экосистем приводят к изменению уровня биологической продуктивности арктических морей (АМ). В частности, расширение площади океана, свободной ото льда и связанное с этим увеличение продолжительности вегетационного сезона могут привести к возрастанию годовых величин первичной продукции [16, 18, 20, 64, 66, 83].

Оценка годовой первичной продукции водоема сопряжена со значительными трудностями, как правило, из-за отсутствия долговременных рядов измерений показателей продуктивности фитопланктона для исследуемой акватории, таких как первичная продукция и концентрация хлорофилла (Хл). В первую очередь это положение можно отнести к арктическим морям, где определения ПП редки из-за суровых климатических условий и проблем, связанных с логистикой. В полной мере это относится и к Карскому морю. В определенной степени указанная проблема может быть разрешена с помощью моделей интегральной первичной продукции и спутниковых данных [16, 17, 20, 42, 64]. Использование такого подхода позволяет заняться решением проблемы в принципе, но ставит перед исследователями новые задачи, связанные с совершенствованием продукционных моделей и использованием спутниковых данных в качестве входящих в эти модели параметров.

Суммарная продукция фотосинтеза арктических морей складывается из первичной продукции фитопланктона, ледовых и подледных водорослей, макрофитов и микрофитобентоса. Известно, что поток органического углерода, создаваемого макрофитами в АМ, составляет не более 0.1% от общего потока фотосинтетического органического вещества [5]. Первичную продукцию микрофитобентоса морей Арктики сложно оценить из-за небольшого количества данных. Эти выводы, в частности, можно применить и к первичным

продуцентам Карского моря. В то же время, ПП ледовой и подледной флоры может вносить значительный вклад в годовую величину первичной продукции АМ из-за больших площадей и длительности покрытия акватории льдом. Так, ПП ледовых водорослей может составлять >50% от общей фотосинтетической продукции в центральном арктическом бассейне [38] и от 4 до 25% в шельфовых морях [55]. Из сказанного следует, что оценку годовой первичной продукции Карского моря необходимо проводить с учетом вклада в эту величину продукции ледовой и подледной флоры.

Оценки годовой ПП Карского моря проводились неоднократно [3, 5, 6, 17, 20, 42, 57, 64, 71]. Эти попытки были предприняты в контексте оценок первичной продукции всего Арктического океана или морей Российского сектора Арктики. Предыдущие оценки проводились с использованием “универсальных” для арктического региона продукционных алгоритмов, осреднение было осуществлено в разные временные интервалы и в отличающихся географических границах Карского моря. Таким образом, представляется полезным проведение оценок ПП этого региона Арктического океана с использованием новых подходов.

Целями настоящей работы являлись: (1) – оценка годовой первичной продукции фитопланктона Карского моря; (2) – оценка годовой первичной продукции ледовой и подледной флоры и ее вклада в суммарную величину ПП. Для достижения этих целей мы впервые предлагаем региональный подход. Он заключается в использовании регионально адаптированных для Карского моря моделей ПП фитопланктона [7] и хлорофилла [10]. Оценка первичной продукции ледовой и подледной флоры была проведена с использованием биофизической модели ПП Арктического океана (UW Model) [49, 89].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Региональные модели первичной продукции и хлорофилла и районирование Карского моря. Оценка годовой ПП фитопланктона проводилась с использованием эмпирических моделей первичной продукции и хлорофилла. Эти модели были разработаны и верифицированы на основе базы данных, созданной по материалам экспедиций в Карское море в конце августа – начале октября [2, 7, 10, 12, 13, 33]. В региональном алгоритме ПП Карского моря [7] в качестве коэффициентов модели использованы средние для всей акватории величины эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды и показателя вертикального распределения хлорофилла. Входящими в модель параметрами являются величины содержания хл “а”

(Хл₀) и дневной приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Известно, что используемые универсальный алгоритм Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) OC3Mv6, а также адаптированные для Арктического океана алгоритмы OC4L и OC4P дают большую ошибку в определении концентрации Хл₀ в водах второго оптического типа (Case II), к которым относятся значительные площади его акватории и, в частности, Карское море [43, 44, 57]. Для того, чтобы избежать этих ошибок, мы использовали региональный алгоритм расчета Хл₀, результаты разработки которого изложены в предыдущей работе [10].

Границы Карского моря были определены, исходя из предыдущих работ по оценке ПП Арктического океана [42]. Опираясь на разработанную ранее классификацию водных масс (ВМ) [67] и подходы к районированию Карского моря [33] на исследованной акватории мы выделили Юго-западный район (I), эстуарии Оби (II) и Енисея (III), Район речного выноса (IV) и Северный район, включающий желоба Св. Анны и Воронина (V) (рис. 1). По сравнению с предыдущей работой [33] южная граница Района речного выноса, ориентированная на среднемноголетнее положение изогалины 25 psu на поверхности, [67] была скорректирована, исходя из данных о положении квазистационарной распресненной линзы в районе Новой Земли [9, 52].

Спутниковые данные. Данные сканера цвета MODIS-Aqua L2 уровня в период с 2002 по 2015 гг. получены с сайта NASA www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/ и обработаны с помощью программного обеспечения, разработанного в ИО РАН [73]. Значения коэффициента яркости моря $R_{RS}(\lambda_i)$ были пересчитаны в величины концентрации хлорофилла на поверхности по региональному алгоритму [10].

Данные по фотосинтетически активной радиации использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua [37]. Как было отмечено в этой работе, модельные величины ФАР превышали измеренные. Анализ данных ФАР Карского моря также показал систематическое завышение спутниковых значений этого параметра. В среднем отношение измеренных и спутниковых величин оказалось равным 0.64 ($N = 30$; $cv = 20\%$). Основываясь на этом эмпирическом отношении, мы использовали полученное значение как поправочный коэффициент для спутниковой ФАР.

Величины первичной продукции рассчитывались для каждого доступного пикселя. Площади акваторий, занятых водами одной цветовой градации, рассчитывались с помощью программного обеспечения [73]. Данные по концентрации Хл₀

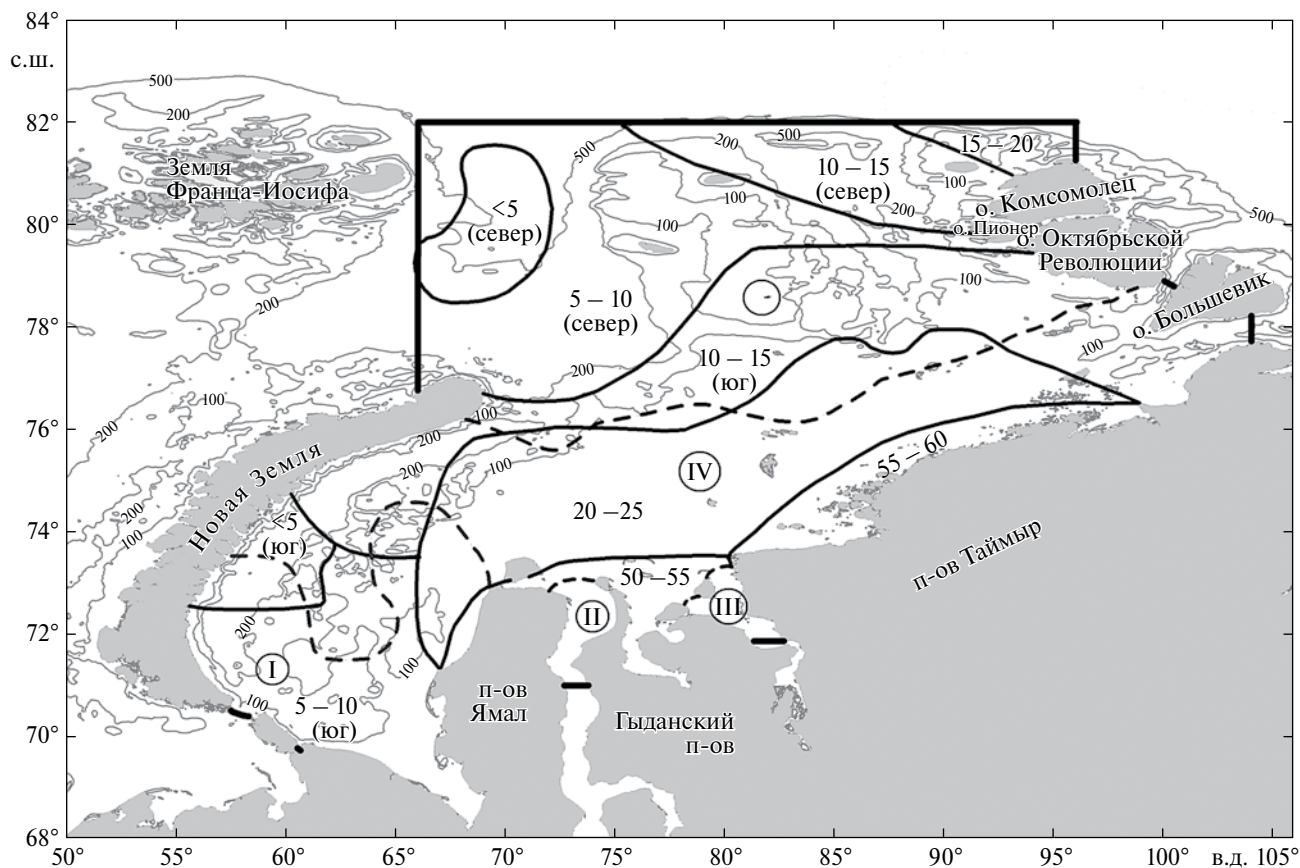


Рис. 1. Районирование Карского моря [8, 67] и среднегодовая первичная продукция ледовой и подледной флоры (ЛПФ) (мгС/м^2 в день) [49]. Пунктирными линиями проведены границы: I – Юго-западный района; II – эстуария Оби; III – эстуария Енисея; IV – Района речного выноса; V – Северного района. Сплошные линии ограничивают площади с различной среднегодовой первичной продукцией ЛПФ. Границы Карского моря проведены согласно [42].

и ФАР усреднялись по месяцам, с апреля по октябрь, за период 2002–2015 гг. При этом средние величины этих параметров экстраполировались на площади, которые были закрыты облаками в течение исследованного периода. Сумма среднегодовых (2002–2015 гг.) величин ПП за вегетационный период (апрель – октябрь) представляет собой искомое значение годовой первичной продукции в столбе воды Карского моря. Известно, что данные MODIS-Aqua доступны с июля 2002 г. Данные за апрель, май и июнь 2002 г. были восстановлены путем осреднения величин ПП и Хл в этот период времени за 2003–2015 гг.

Оценка первичной продукции ледовой и подледной флоры. Для оценки годовой ПП ледовой и подледной флоры (ЛПФ) была использована интегрированная биофизическая модель UW Model [89]. В оригинале эта модель включает четыре блока: морской лед, океаническую циркуляцию, экосистему пелагиали и ледовые водоросли. Последний компонент модели учитывает диатомовых и флагеллят, населяющих нижние 2 см льда. Механизм

обмена биогенами и биотой между нижней границей льда и подледной водой описан в [48]. Модель была верифицирована по полевым наблюдениям на шельфе и континентальном склоне Чукотского моря и моря Бофорта [39].

Продуктом модельных расчетов является карта распределения среднегодовых величин первичной продукции подо льдом в Арктическом океане [49]. Модифицированный фрагмент этой карты, отображающий среднегодовые величины ПП Карского моря, представлен на рис. 1. Далее, рассчитав среднегодовые площади акваторий, покрытых льдом в период с апреля по октябрь, можно оценить годовую ПП ледовой и подледной флоры. Они рассчитывались по первичным данным, полученным с сайта ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202_v2/north/daily NSIDC (National Snow and Ice Data Center) NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственная изменчивость первичной продукции Карского моря. Общая закономерность распределения первичной продукции по акватории Карского моря заключается в постепенном уменьшении ее величин от эстуариев Оби и Енисея и берегов по направлению к открытым районам. Эту тенденцию иллюстрируют среднегодовые (2002–2015 гг.) величины ПП (рис. 2). Районы юго-запада моря (I), примыкающие к п-ову Ямал, и Байдарацкую губу занимают воды со среднегодовыми значениями первичной продукции от 150 до 200 мгС/м² в день. Акватории в центральной части этого района и у Новой Земли характеризуются значениями ПП от 125 до 150 мгС/м² в день. В эстуариях Оби и Енисея (II и III) в среднем за год доминируют воды с ПП > 250 мгС/м² в день. Акватории со среднегодовой ПП от 200 до 250 мгС/м² в день занимают лишь северные районы эстуария Енисея (рис. 2). В южных акваториях Района речного выноса (IV) величины первичной продукции варьируют от > 250 мгС/м² в день в областях, примыкающих к речным эстуариям, до диапазона 150–200 мгС/м² в день на 75–76° с.ш.

и у северо-восточных берегов п-ова Таймыр. Воды со среднегодовой ПП от 125 до 150 мгС/м² в день расположены на западе и востоке Района речного выноса. Акватории Северного района (V), примыкающие на юге к Району речного выноса, характеризуются среднегодовыми значениями ПП в диапазоне 125–150 мгС/м² в день. При продвижении на север величины первичной продукции, в основном, снижаются до диапазонов 100–125, 50–100 и < 50 мгС/м² в день. Отдельные пятна повышенных среднегодовых значений ПП (150–200 мгС/м² в день) отмечаются к востоку от Земли Франца-Иосифа и в районе 80° с.ш. (рис. 2).

Годовые величины первичной продукции фитопланктона Карского моря. Близкие осредненные для районов величины ПП фитопланктона зафиксированы в эстуарии Оби, Районе речного выноса и эстуарии Енисея (208, 196 и 175 мгС/м² в день, соответственно). Снижение этих значений отмечено в Юго-западном и Северном районах (160 и 135 мгС/м² в день, соответственно) (табл. 1). Средняя для всего моря величина ПП фитопланктона составила 165±17 мгС/м² в день. Годовые величины ПП для эстуария Оби, Района речного

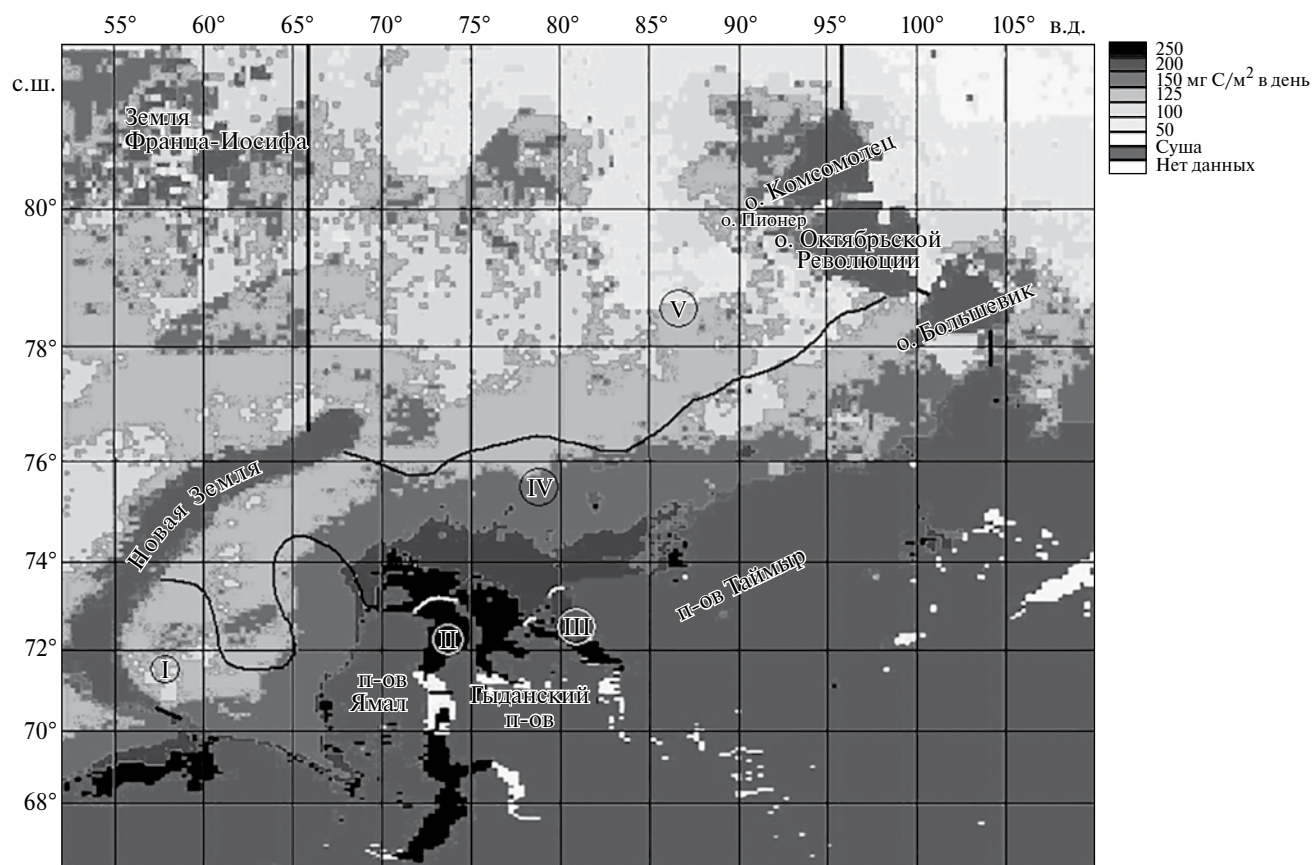


Рис. 2. Среднегодовая (2002–2015 гг.) первичная продукция фитопланктона Карского моря (мгС/м² в день). Условные обозначения см. в подписи к рис. 1.

выноса и эстуария Енисея составили соответственно 45, 42 и 37 гС/м². В Юго-западном и Северном районах годовые величины первичной продукции оказались равными 34 и 29 гС/м², соответственно.

Годовая величина первичной продукции фитопланктона всего Карского моря равна $13 \pm 2.49 \times 10^{12}$ гС. Самой продуктивной акваторией оказался Район речного выноса, где годовая величина ПП составляет 6.26×10^{12} гС (48.2% от суммарной годовой ПП). Юго-западный и Северный районы в 2.3 и 1.7 раза менее продуктивны (2.75×10^{12} и 3.61×10^{12} гС в год, соответственно, 21.2 и 27.8% от суммарной годовой ПП). В эстуариях Оби и Енисея годовые величины ПП низкие из-за незначительных в масштабах всего Карского моря площадей этих районов (0.26×10^{12} и 0.12×10^{12} гС, соответственно, 2.0 и 0.9% от суммарной ПП) (табл. 1).

Максимальные значения годовой ПП фитопланктона зарегистрированы в июле в Юго-западном районе, эстуарии Оби и в Районе речного выноса, и июле–августе в эстуарии Енисея и Северном районе (рис. 3, табл. 2). Следует отметить, что сезонный максимум ПП, рассчитанной на площадь моря, сдвинут на июль по сравнению с кривыми сезонных изменений среднемесячной величины первичной продукции, которые имеют максимум в июне [8]. Такая картина обусловлена увеличением ПП в июле за счет большей площади акваторий, свободных ото льда.

Доля интегральной первичной продукции фитопланктона в различные месяцы вегетационного сезона (апрель – октябрь, 214 дней) показана в табл. 3. Как и следовало ожидать, в течение календарного лета в различных районах Карского моря создается от 76 до 82% суммарной годовой первичной продукции. В среднем для моря с июня по август в процессе фотосинтеза образуется 78% углерода фитопланктона. На долю календарных весны (апрель, май) и осени (сентябрь, октябрь) приходится, соответственно, 5 и 17% суммарной годовой ПП.

Годовые величины первичной продукции ледовой и подледной флоры. Первичная продукция ЛПФ Карского моря оказалась равной $1.7 \pm 0.2 \times 10^{12}$ гС в год, что составляет 12% от суммарной (фитопланктон свободной ото льда пелагиали + ледовые и подледные водоросли) годовой ПП. Среднегодовая величина ЛПФ Карского моря равняется 20 ± 20 мгС/м² в день (табл. 1). Суммарная продукция ЛПФ закономерно уменьшается с апреля по сентябрь от 0.44×10^{12} до 0.06×10^{12} гС и незначительно увеличивается в октябре до 0.16×10^{12} гС вследствие сокращения в течение года площади ледового покрова. Доля ПП ЛПФ в суммарной первичной продукции максимальна в апреле (79%) и минимальна в августе и сентябре (2 и 3%, соответственно) (табл. 2, рис. 4). В целом пространственная изменчивость первичной продукции ЛПФ похожа на соответствующие изменения ПП фитопланктона свободной ото льда пелагиали (рис. 1). Так, максимальные годовые значения ПП ЛПФ, от 0.23×10^{12} до 0.46×10^{12} гС зафиксированы

Таблица 1. Интегральная в столбе воды первичная продукция фитопланктона (ПП) и первичная продукция ледовой и подледной флоры Карского моря, осредненная за 2002–2015 гг.

Район	Площади районов (S)			ПП районов				
	км ²	% от ΣS	средний за год % S, свободной ото льда	мгС/м ² в день	гС/м ² в год	10 ¹² гС в год	% от Σ ПП	
Юго-западный	158 631	17.2	58.9 ± 6.4	160 ± 8	34 ± 2	2.75 ± 0.46	21.2	
Эстуарий Оби	13 078	1.4	35.4 ± 7.9	208 ± 6	45 ± 1	0.26 ± 0.05	2.0	
Эстуарий Енисея	10 529	1.1	24.5 ± 6.4	175 ± 10	37 ± 2	0.12 ± 0.04	0.9	
Район речного выноса	358 542	38.8	50.5 ± 8.3	196 ± 12	42 ± 3	6.26 ± 1.19	48.2	
Северный	383 496	41.5	42.6 ± 14.1	135 ± 14	29 ± 3	3.61 ± 1.24	27.8	
Все море	S	924 276	100	48.2 ± 9.5				
	Фитопланктон				165 ± 17	35 ± 4	13 ± 2.49	100
	Ледовая и подледная флора				20 ± 20		$\frac{1.7 \pm 0.2}{12^*}$	

Примечание. Представлены средние арифметические величины и стандартное отклонение.

*Вклад ПП ледовой и подледной флоры в суммарную годовую ПП Карского моря (%).

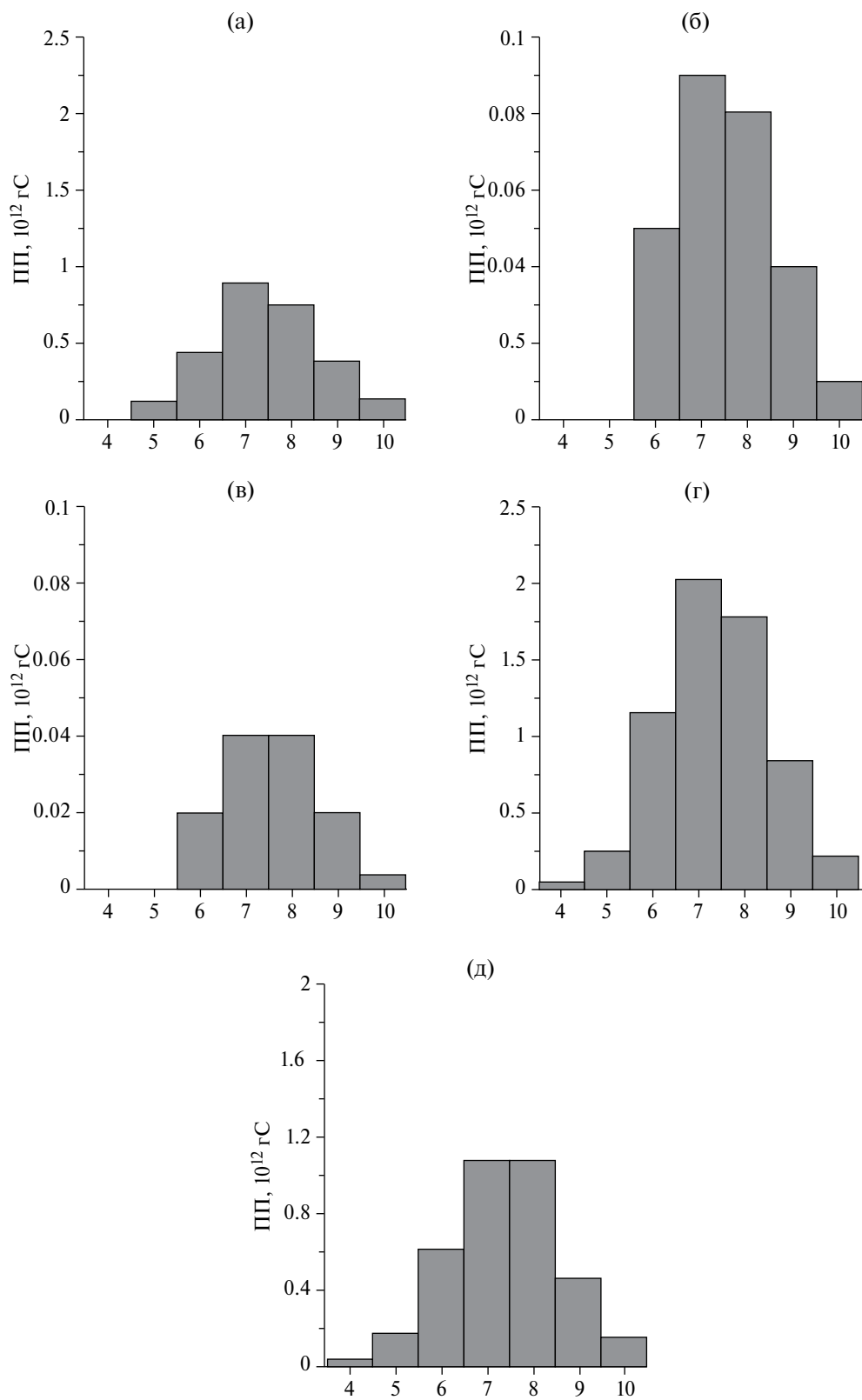


Рис. 3. Сезонные изменения первичной продукции фитопланктона (ПП) в различных районах Карского моря. (а) – Юго-западный район; (б) – эстуарий Оби; (в) – эстуарий Енисея; (г) – Район речного выноса; (д) – Северный район.

Таблица 2. Первичная продукция (10^{12} гС) в различных районах Карского моря в течение вегетационного периода, осредненная за 2002–2015 гг.

Месяц	Район					Все море	
	Юго-западный	Эстуарий Оби	Эстуарий Енисея	Район речного выноса	Северный район	ПП пелагиали, ледовой и подледной флоры	Суммарная ПП и вклад (%) ледовой и подледной флоры
Апрель	0.02 ± 0.02	нет данных	нет данных	0.05 ± 0.05	0.05 ± 0.04	0.12 ± 0.08 (0.44 ± 0.08)	$\frac{0.56}{79}$
Май	0.12 ± 0.11	нет данных	нет данных	0.24 ± 0.21	0.19 ± 0.11	0.55 ± 0.36 (0.41 ± 0.02)	$\frac{0.96}{43}$
Июнь	0.44 ± 0.26	0.05 ± 0.02	0.02 ± 0.01	1.15 ± 0.47	0.62 ± 0.33	2.28 ± 0.92 (0.31 ± 0.05)	$\frac{2.59}{12}$
Июль	0.89 ± 0.13	0.09 ± 0.02	0.04 ± 0.01	2.01 ± 0.45	1.08 ± 0.44	4.11 ± 0.97 (0.18 ± 0.07)	$\frac{4.29}{4}$
Август	0.75 ± 0.05	0.08 ± 0.02	0.04 ± 0.01	1.78 ± 0.19	1.08 ± 0.32	3.73 ± 0.52 (0.08 ± 0.05)	$\frac{3.81}{2}$
Сентябрь	0.39 ± 0.03	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.004	0.82 ± 0.11	0.46 ± 0.13	1.73 ± 0.26 (0.06 ± 0.04)	$\frac{1.79}{3}$
Октябрь	0.14 ± 0.02	0.01 ± 0.002	0.004 ± 0.001	0.21 ± 0.06	0.16 ± 0.09	0.52 ± 0.16 (0.16 ± 0.09)	$\frac{0.68}{24}$

Примечание. Представлены средние арифметические величины и стандартное отклонение. Значения в скобках – первичная продукция ледовой и подледной флоры.

Таблица 3. Доля (%) ПП фитопланктона в различные месяцы вегетационного сезона в суммарной годовой первичной продукции пелагиали

Район	Месяц						
	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Юго-западный	0.7	4.4	16.0	32.4	27.3	14.2	5.1
Эстуарий Оби	нет данных	нет данных	18.4	33.8	30.0	14.6	3.0
Эстуарий Енисея	нет данных	нет данных	16.0	32.6	32.6	16.0	2.6
Район речного выноса	0.8	3.8	18.4	32.1	28.4	13.1	3.4
Северный район	1.4	5.3	17.2	29.9	29.9	12.7	4.4
Все море	0.9	4.2	17.5	31.6	28.7	13.3	4.0

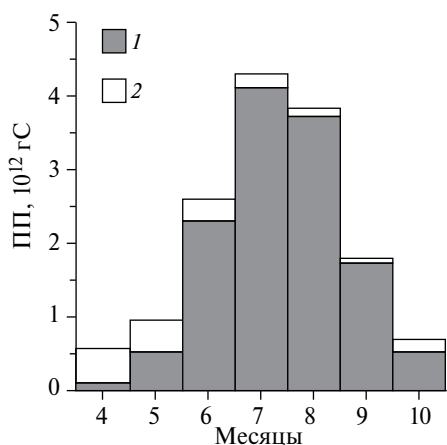


Рис. 4. Сезонные изменения первичной продукции фитопланктона – 1, ледовой и подледной флоры – 2 в Карском море.

в прибрежных районах у п-ова Таймыр, в эстуариях и приэстуарных акваториях Оби и Енисея и в Районе речного выноса. Минимальные величины ПП ЛПФ (0.02×10^{12} – 0.11×10^{12} гС в год) характерны для акваторий Северного и Юго-западного районов (табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение с предыдущими оценками годовой первичной продукции фитопланктона Карского моря. Сопоставление результатов нашей оценки годовой

ПП свободной ото льда пелагиали Карского моря с литературными данными (табл. 5) затруднено по следующим причинам: во-первых, предыдущие оценки сделаны в разные годы и период осреднения различен по продолжительности; во-вторых, для осреднения авторами использована различная продолжительность вегетационного сезона; в-третьих, в разных источниках оценка годовой ПП выполнена либо в географических границах Карского моря, либо в пределах так называемого Карского сектора Арктического океана, частично включающего акватории Баренцева моря, моря Лаптевых и Центральный Арктический бассейн.

Анализ предыдущих оценок годовой ПП Карского (табл. 5) позволяет разделить их результаты на две группы: близкие к нашим, которые различаются менее чем в два раза [5, 6, 42] и оценки, превышающие этот порог [3, 17, 57, 64, 71]. Обращает на себя внимание, что во вторую группу попали результаты оценок годовой ПП в Карском секторе [17, 64]. Превышение наших данных соответственно в 5 и 3 раза можно в первую очередь объяснить оценками ПП заведомо большей по площади и продуктивности (северо-восточная часть Баренцева моря) акватории, чем Карское море в его географических границах. Следует отметить, что отсутствие апреля и октября у разных авторов в пределах вегетационного сезона вносит наименьший вклад в вариабельность оценки годовой ПП. Как показано в табл. 3, вклад этих месяцев в суммарную годовую первичную продукцию свободных ото

Таблица 4. Годовая первичная продукция (10^{12} гС) ледовой и подледной флоры, осредненная за 2002–2015 гг.

	Продукционные районы и диапазоны среднегодовых величин продукции ледовой и подледной флоры, мгС/м ² в день (рис. 1) [49]									
	55–60	50–55	< 5 (юг)	< 5 (север)	5–10 (юг)	5–10 (север)	20–25	15–20	10–15 (юг)	10–15 (север)
Средне-годовая площадь ледового покрытия района (10^3 км ²)	19 ± 3.2	29.2 ± 2.7	12.5 ± 2.8	15.8 ± 4.8	53.5 ± 8.9	70.9 ± 20.1	96.6 ± 21.1	6.3 ± 1.2	105.6 ± 19.8	31.7 ± 6.7
Средне-годовая площадь ледового покрытия района (%)	55 ± 9	59 ± 5	42 ± 1	57 ± 17	42 ± 7	52 ± 15	45 ± 1	78 ± 15	57 ± 10	71 ± 15
Годовая ПП	0.23 ± 0.04	0.33 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.11 ± 0.07	0.11 ± 0.03	0.46 ± 0.1	0.02 ± 0.01	0.28 ± 0.05	0.08 ± 0.02

Примечание. Представлены средние арифметические величины и стандартное отклонение.

Таблица 5. Оценки годовой величины первичной продукции Карского моря

Источник	Период осреднения (годы)	Вегетационный сезон (месяцы)	Границы моря	Годовая первичная продукция, 10^{12} гС
[6]	Использованы полевые данные до конца 80-х гг. XX в.	Экстраполяция результатов, полученных в летне-осенний период на весь вегетационный сезон	Географические	13.5
[5]	1978–1986	май – сентябрь	Географические	< 20
[3]	2003–2012	апрель – октябрь	Географические	26 (2.6*)
[17]	1998–2012	май – сентябрь	Секторальные	66.6
[71]	Использованы полевые данные до конца 90-х гг. XX в.	Экстраполяция результатов, полученных в летне-осенний период на весь вегетационный сезон	Географические	37(с учетом продукции ледовых водорослей)
[42]	1998–2007	май – сентябрь	Географические	17
[64]	1998–2006	апрель – октябрь	Секторальные	43
[57]	2003–2013	не известен	Географические	43–74
Наши данные	2002–2015	апрель – октябрь	Географические	13 (1.7**)

* Годовая первичная продукция ледовой флоры.

** Годовая первичная продукция ледовой и подледной флоры.

льда акваторий незначителен и составляет 0.9 и 4% соответственно.

Предыдущие оценки годовой первичной продукции фитопланктона Карского моря выполнены по экспедиционным данным [6, 71] или с использованием продукционных моделей и спутниковых данных в качестве входящих в эти модели параметров [3, 5, 17, 42, 57, 64]. Результаты оценки годовой ПП Карского моря, представленные в настоящей статье, получены при помощи второго подхода. Алгоритмы, использованные в работах [3, 5, 42] основаны на зависимости первичной продукции от концентрации хлорофилла без введения в расчетные формулы фотоадаптивных параметров и ФАР. Известно, что при таком подходе “хлорофильные” продукционные модели завышают величины ПП в регионах с низкой температурой [25]. Частично это факт является объяснением превышения годовой первичной продукции по сравнению с нашими оценками в 2 раза в работе [3] и, правда незначительное (в 1.3 раза), в работе [42]. К сожалению, не представляется возможным корректно провести сравнение наших оценок ПП с результатами, приведенными в работе [5]. Известно, что расчеты величин концентрации Хл и количество данных, полученных при помощи сканера цвета океана Coastal Zone Color Scanner (CZCS), на которые опирались эти авторы, значительно отличаются от современных [22].

В работе [57] проведены исследования межгодовой изменчивости (2003–2013 гг.) годовой

первичной продукции Карского моря. Эти авторы сравнили результаты расчетов ПП при введении в продукционную модель [64] величин концентрации хлорофилла, полученные при помощи различных алгоритмов. Расчет средней величины годовой первичной продукции Карского моря за период 2003–2013 гг., проведенный нами по данным [57], показывает, что при использовании “стандартного” алгоритма, разработанного для Мирового океана (ОС3М6), ПП Карского моря составила 43×10^{12} гС. При расчете с применением алгоритма для Арктического океана (ОС4L) аналогичная величина составила 74×10^{12} гС. Наконец, введение в модель значений Хл, рассчитанных по алгоритму, разработанному авторами для Чукотского моря (ОС3L), дало величину годовой ПП, равную 52×10^{12} гС. Таким образом, годовые величины ПП фитопланктона Карского моря оказались в 3.3–5.7 раз выше приведенных в настоящей работе.

Годовая величина ПП фитопланктона, рассчитанная на единицу площади моря (35 гС/м²) (табл. 1) оказалась очень близкой к результатам предыдущих оценок (30 – 50 гС/м²) [71]. В то же время, общая годовая величина первичной продукции для всей акватории Карского моря (13×10^{12} гС) по нашим оценкам находится у нижнего предела диапазона значений по литературным данным (табл. 5). Более того, мы считаем нашу оценку завышенной по следующей причине. Продукционный алгоритм, использованный в настоящей работе, подразумевает введение в формулу

расчета значений ФАР только при свободном от облаков небе, когда доступны данные по концентрации хлорофилла, т.е. в ясную солнечную погоду, завышая, таким образом, первичную продукцию на неопределенную величину. ПП, полученную с использованием нашей модели, можно условно назвать “первичной продукцией чистого неба”.

Сравнение с предыдущими оценками годовой первичной продукции ледовой и подледной флоры. Вклад ЛПФ в суммарную величину первичной продукции в разных регионах Арктики может достигать 40%, а в среднем составляет 7.5% [34]. В Центральных районах Арктики годовая продукция ЛПФ может превышать 50% от суммарной ПП (фитопланктона свободной ото льда воды и микроводорослей, обитающих во льду и подо льдом) [38]. В шельфовых морях Арктического океана вклад ЛПФ снижается до 3–25% [38, 47, 55, 79] или даже до величин $< 1\%$ [61]. По другим оценкам доля ледовой и подледной флоры в чистой продукции сообщества (первичная продукция с вычетом потерь на дыхание всеми компонентами сообщества) может быть значительной и составлять 50–90% [58].

В арктических морях “цветение” фитопланктона может начинаться ранней весной подо льдом и в полыньях [14, 15, 31, 39, 54, 62]. По-видимому, такое утверждение справедливо для акваторий, которые не испытывают недостатка в биогенных элементах и характеризующихся не только “цветением” ЛПФ, но и массовым развитием фитопланктона в свободных ото льда водах [32]. В таких морях наблюдается два пика развития флоры: “ледовый” максимум и “цветение” фитопланктона [46, 56, 35, 88]. Карское море относится к регионам с невысокой годовой первичной продукцией. Одной из причин этому служит резкая плотностная стратификация в течение практически всего года, которая затрудняет поступление биогенов в эвфотическую зону [8]. Таким образом, сложно ожидать в этом регионе массовое развитие ледовой и подледной флоры ранней весной [49]. Рассчитанная нами по данным моделирования [49] и осредненной динамике площади ледового покрова величина годовой первичной продукции ЛПФ (1.7×10^{12} гС) составляет 12% от суммарной годовой ПП (14.7×10^{12} гС) и находится в диапазоне недавних оценок этой величины в Карском море, от 0.6×10^{12} гС [32] до 2.6×10^{12} гС [3]. Вклад ПП ЛФК в суммарную годовую первичную продукцию оказался близким к предыдущей оценке 9%, приведенной в работе [3].

Представляет несомненный интерес оценка потенциальной величины годовой первичной продукции Карского моря в условиях полного освобождения акватории ото льда при реализации

прогноза потепления Арктики [45, 63]. Наша оценка показывает, что в свободном в течение года Карском море фитопланктоном будет продуцировано 32×10^{12} гС в год. Таким образом, годовая первичная продукция увеличится приблизительно в 2.5 раза. Даже при реализации такого сценария годовая ПП Карского моря будет, по разным оценкам, в 2–4 раза ниже уровня, характерного для продуктивных районов Арктики, например, Баренцева моря [3, 5, 17, 42, 71].

Авторы благодарят GSFC DAAC (Goddard Space Flight Center, Distributed Active Archive Center) NASA за возможность использования спутниковой информации сканера MODIS-Aqua, а также NSIDC NOAA за предоставление доступа к данным по площади ледового покрытия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00050) и Государственного задания ФАНО № 0149-2018-0035. Экспедиционные работы выполнены при поддержке РНФ (грант № 14-50-00095, направление “Экосистемы стратегически важных для Российской Федерации морских регионов”). Обработка спутниковых данных выполнена при поддержке РНФ (грант № 14-50-00095, направление: “Взаимодействие физических, биологических и геологических процессов в береговой зоне, прибрежных акваториях и внутренних морях”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биогеохимия океана / Ред. Монин А.С., Лисицин А.П. М.: Наука, 1983. 368 с.
2. Ведерников В.И., Демидов А.Б., Судьбин А.И. Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 693–703.
3. Ветров А.А., Романкевич Е.А. Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в арктических морях Евразии в 2003–2012 гг. // *Докл. РАН*. 2014. Т. 454. № 1. С. 97–99.
4. Виноградов М.Е. Развитие пелагических сообществ и биотический баланс океана // *Океанология на старте XXI века* / Ред. Верещака А.Л. М.: Наука, 2008. С. 257–292.
5. Виноградов М.Е., Ведерников В.И., Романкевич Е.А., Ветров А.А. Компоненты цикла углерода в Арктических морях России. Первичная продукция и поток $C_{орг}$ из фотического слоя // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 2. С. 221–233.
6. Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С. и др. Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.

7. Демидов А.Б., Мошаров С.А., Артемьев В.А. и др. Интегрированные и разрешающие по глубине модели первичной продукции Карского моря // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 4. С. 563–576.
8. Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И., Хлебонашев П.В. Сезонная изменчивость первичной продукции фитопланктона Карского моря по спутниковым данным // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 103–117.
9. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
10. Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. и др. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-AQUA // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 5. С. 21–31.
11. Лисицин А.П. Рассеянный осадочный материал биосферы морей и океанов // *Мировой океан*. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / Ред. Нигматулин Р.И., Лобковский Л.И. М.: Научный мир, 2014. С. 424–464.
12. Мошаров С.А. Распределение первичной продукции и хлорофилла “а” в Карском море в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
13. 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.
14. Arrigo K.R., Perovich D.K., Pickart R.S. et al. Massive phytoplankton bloom under Arctic sea ice // *Science*. 2012. V. 336. P. 1408.
15. Arrigo K.R., Perovich D.K., Pickart R.S. et al. Phytoplankton blooms beneath the sea ice in the Chukchi Sea // *Deep-Sea Res II*. 2014. V. 105. P. 1–16.
16. Arrigo K.R., van Dijken G.L. Secular trends in Arctic Ocean net primary production // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C09011. doi: 10.1029/2011JC007151.
17. Arrigo K.R., van Dijken G.L. Continued increases in Arctic Ocean primary production // *Progr. in Oceanogr.* 2015. V. 136. P. 60–70.
18. Arrigo K.R., van Dijken G.L., Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 19. doi: 10.1029/2008GL035028.
19. Barber D.G., Lukovich J.V., Keogak J. et al. The changing climate of the Arctic // *Arctic*. 2008. V. 61. № 1. P. 7–26.
20. Bélanger S., Babin M., Tremblay J.-E. Increasing cloudiness in Arctic damps the increase in phytoplankton primary production due to sea ice receding // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. № 6. P. 4087–4101.
21. Behrenfeld M.J., O'Malley R.O., Siegel D.A. et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity // *Nature*. 2006. V. 444. P. 752–755.
22. Blondeau-Patissier D., Gower J.F.R., Dekker A.G. et al. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans // *Prog. Oceanogr.* 2014. V. 123. P. 123–144.
23. Bopp L., Monfray P., Aumont O. et al. Potential impact of climate change on marine export primary production // *Global Biogeochem. Cycles*. 2001. V. 15. № 1. P. 81–99.
24. Carmack E., Barber D., Christensen J. et al. Climate variability and physical forcing of the food webs and the carbon budget on panarctic shelves // *Progr. Oceanogr.* 2006. V. 71. P. 145–181.
25. Carr M.-E., Friedrichs M.A.M., Schmeltz M. et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color // *Deep-Sea Res. II*. 2006. V. 53. P. 741–770.
26. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 881–889.
27. Chavez F.P., Messié M., Pennington J.T. Marine primary production in relation to climate variability and change // *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2011. V. 3. P. 227–260.
28. Comiso J.C. The rapid decline of multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. doi:10.1175/JCLI-D11-00113.1.
29. Comiso J.C., Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. C02S07. doi:10.1029/2007JC0043257.
30. Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L01703. doi:10.1029/2007GL031972.
31. Cota G.F., Legendre L., Gosselin M., Ingram R.G. Ecology of bottom ice algae: I. Environmental controls and variability // *J. Mar. Sys.* 1991. V. 2. P. 257–277.
32. Deal C., Jin M., Elliot S. et al. Large-scale modeling of primary production and ice algal biomass within arctic sea ice in 1992 // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C07004, doi:10.1029/2010JC006409.
33. Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaveev P.N. Patterns of the Kara Sea primary production in autumn: Biotic and abiotic forcing of subsurface layer // *J. Mar. Sys.* 2014. V. 132. P. 130–149.
34. Dupont F. Impact of sea-ice biology on overall primary production in a biophysical model of the pan-Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C00D17, doi:10.1029/2011JC006983.
35. Falk-Petersen S., Timofeev S., Pavlov V., Sargent J.R. Climate variability and the effect on Arctic food chains. The role of *Calanus* // *Arctic-Alpine ecosystems and People in a Changing Environment* / Eds. Ørbak et al. Berlin: Springer, 2007. P. 147–166.
36. Fay A.R., McKinley G.A. Global trends in surface ocean pCO₂ from in situ data // *Global Biogeochem. Cycles*. 2013. V. 27. P. 541–557.
37. Frouin R., McPherson J., Ueyoshi K., Franz B.A. A time series of photosynthetically available radiation at

- the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data // Proc. SPIE12. <http://dx.doi.org/10.1117/1112.981264>.
38. Gosselin M., Lefebvre M., Wheeler P. et al. New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean // Deep-Sea Res. II. 1997. V. 44. P. 1623–1644.
 39. Gradinger R. Sea-ice algae: Major contributions to primary production and algal biomass in the Chukchi and Beaufort Seas during May/June 2002 // Deep-Sea Res. 2009. V. 56. P. 1201–1212.
 40. Gregg W.W., Conkright M.E., Ginoux P. et al. Ocean primary production and climate: Global decadal changes // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 15. 1809, doi:10.1029/2003GL016889.
 41. Henson S.A., Sanders R., Madsen E. Global patterns in efficiency of particulate organic carbon export and transfer to the deep ocean // Global Biogeochem. Cycles. 2012. V. 26. GB1028, doi:10.1029/2011GB004099.
 42. Hill V.J., Matrai P.A., Olson E. et al. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. *In situ* and remotely sensed estimates // Progr. in Oceanogr. 2013. V. 110. P. 107–125.
 43. IOCCG, 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters // Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. № 3 / Ed. Sathyendranath S. Dartmouth: MacNab Print, 2000. 140 p.
 44. IOCCG, 2015. Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas // Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. № 16 / Eds. Babin M. et al. Dartmouth: NOAA, 2015. 130 p.
 45. IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
 46. Ji R., Jin M., Varpe Ø. Sea ice phenology and timing of primary production pulses in the Arctic Ocean // Global Change Biol. 2013. V. 19. P. 734–741.
 47. Jin M., Deal C., Lee S.H. et al. Investigation of Arctic sea ice and oceanic primary production for the period 1992–2007 using a 3-D global ice-ocean ecosystem model // Deep-Sea Res. II. 2012. V. 81–84. P. 28–35.
 48. Jin M., Deal C.J., Wang J. et al. Controls of the landfast ice-ocean ecosystem offshore Barrow, Alaska // Ann. Glaciol. 2006. V. 44. P. 63–72.
 49. Jin M., Popova E.E., Zhang J. et al. Ecosystem model intercomparison of under-ice and total primary production in the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 934–948.
 50. Kahru M., Brotas V., Manzano-Sarabia M., Mitchell B.G. Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? // Glob. Ch. Biol. 2011. V. 17. P. 1733–1739.
 51. Kearney K.A., Stock C., Sarmiento J.L. Amplification and attenuation of increased primary production in a marine food web // Mar. Ecol. Progr. Ser. 2013. V. 491. P. 1–14.
 52. Kubryakov A., Stanichny S., Zatsepin A. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // Rem. Sens. Env. 2016. V. 176. P. 177–187.
 53. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M. et al. Thinning and volume loss of Arctic sea ice: 2003–2008 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C07005. doi:10.1029/2009JC005312.
 54. Lee S.H., Stockwell D.A., Joo H.-M. et al. Phytoplankton production from melting ponds on Arctic sea ice // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. C04030, doi:10.1029/2011JC007717.
 55. Legendre L., Ackley S.F., Dieckmann G.S. et al. Ecology of sea ice biota: Part 2. Global significance // Polar Biol. 1992. V. 12. P. 429–444.
 56. Leu E., Søreide J.E., Hessen D.O. et al. Consequences of changing sea-ice cover for primary and secondary producers in the European Arctic shelf seas: Timing, quantity, and quality // Progr. Oceanogr. 2011. V. 90. P. 18–32.
 57. Lewis K.M., Mitchell B.G., van Dijken G.L., Arrigo K.R. Regional chlorophyll *a* algorithms in the Arctic Ocean and their effect on satellite-derived primary production estimates // Deep-Sea Res. II. 2016. V. 130. P. 14–27.
 58. Matrai P., Apollonio S. New estimates of microalgae based upon nitrate reductions under sea ice in Canadian shelf seas and Canada Basin of the Arctic Ocean // Mar. Biol. 2013. V. 160. P. 1297–1309.
 59. May R., McLean A. Theoretical ecology: principles and applications. Oxford: 2007. 272 p.
 60. McLaughlin F.A., Carmack E.C., Williams W.J. et al. Joint effects of boundary currents and thermohaline intrusions on the warming of Atlantic water in the Canada Basin, 1993–2007 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C00A12, doi:10.1029/2008JC005001.
 61. Mikkelsen D.M., Søren Rysgaard S., Nøhr Glud R. Microalgal composition and primary production in Arctic sea ice: a seasonal study from Kobbefjord (Kangerluarsunnguag), West Greenland // Mar. Ecol. Progr. Ser. 2008. V. 368. P. 65–74.
 62. Mundy C.J., Gosselin M., I Jens Ehn et al. Contribution of under-ice primary production to an ice-edge upwelling phytoplankton bloom in the Canadian Beaufort Sea // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L17601, doi:10.1029/2009GL038837.
 63. Overland J.E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. № 10. P. 2097–2101.
 64. Pabi S., van Dijken G.L., Arrigo K.R. Primary production in the Arctic Ocean, 1998–2006 // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C08005. doi:10.1029/2007/JC004578.
 65. Pauly D., Christensen V. Primary production required to sustain global fisheries // Nature. 1995. V. 374. P. 255–257.
 66. Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J. et al. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean // Inter. J. Rem. Sens. 2013. V. 34. P. 3903–3937.

67. *Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A.* River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea // Siberian river run-off in the Kara Sea / Eds. Stein R. et al. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 9–25.
68. *Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C. et al.* One more step toward a warmer Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L17605, doi:10.1029/2005GL023740.
69. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Timokhov T.A.* Warming of the intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean in the 2000s // *J. Clim.* 2012. V. 25. P. 8362–8370.
70. *Ryther J.H.* Photosynthesis and fish production in the sea. The production of organic matter and its conversion to higher forms of life vary throughout the world ocean // *Science.* 1969. V. 166. P. 72–76.
71. *Sakshaug E.* Primary and secondary production in the Arctic Seas // *The organic carbon cycle in the Arctic ocean* / Eds. Stein R., Macdonald R.W. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 57–81.
72. *Sarmiento J.L., Slater R., Barber R. et al.* Response of ocean ecosystems to climate warming // *Global Biogeochem. Cycles.* 2004. V. 18. GB3003, doi:10.1029/2003GB002134.
73. *Sheberstov S.V., Lukyanova E.A.* A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field biooptical data // Proceedings of IV international conference “Current problems in optics of natural waters”, Nizhny Novgorod. 2007. P. 179–183.
74. *Siegel D.A., Buesseler K.O., Doney S.C. et al.* Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models // *Global Biogeochem. Cycles.* 2014. V. 28. № 3. P. 181–196.
75. *Slagstad D., Ellingsen I.H., Wassmann P.* Evaluating primary and secondary production in an Arctic Ocean void of summer sea ice: an experimental simulation approach // *Prog. Oceanogr.* 2011. V. 90. P. 117–131.
76. *Stroeve J., Holland M., Meier W. et al.* Arctic sea ice decline: Faster than forecast // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L09501. doi: 10.1029/2007GL029703.
77. *Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A.P. et al.* Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L16502. doi:10.1029/2012GL052676.
78. *Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M. et al.* The Arctic’s rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // *Clim. Change.* 2012. V. 110. P. 1005–1027.
79. *Subba Rao D.V., Platt T.* Primary production of Arctic waters // *Pol. Biol.* 1984. V. 3. P. 191–201.
80. *Taucher J., Oeschlies A.* Can we predict the direction of marine primary production change under global warming? // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L02603, doi:10.1029/2010GL045934.
81. *Tremblay J.-É., Bélanger S., Barber D.G.* Climate forcing multiplies biological productivity in the coastal Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L18604, doi:10.1029/2011GL048825.
82. *Tremblay J.-É., Robert D., Varela D.E. et al.* Current state and trends in Canadian Arctic marine ecosystems: I. Primary production // *Clim. Ch.* 2012. doi:10.1007/s10584-012-0496-3.
83. *Vancoppenolle M., Bopp L., Madec G. et al.* Future Arctic Ocean primary productivity from CMIP5 simulations: Uncertain outcome, but consistent mechanisms // *Global Biogeochem. Cycle.* 2013. V. 27. P. 605–619. doi:10.1002/gbc.20055.
84. *Volk T., Hoffert M.I.* Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO₂ changes // *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂ Natural Variations Archean to Present* / *Geophys. Monogr. Ser. AGU.* 1985. V. 32. P. 99–110.
85. *Wassmann P., Duarte C.M., Agusti S., Sejr M.K.* Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem // *Glob. Ch. Biol.* 2010. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02311.x.
86. *Wassmann P., Slagstad D., Ellingsen I.* Primary production and climatic variability in the European sector of the Arctic Ocean prior to 2007: preliminary results // *Polar Biol.* 2010. V. 33. P. 1641–1650.
87. *Zhang J., Ashjian C., Campbell R. et al.* The great 2012 Arctic Ocean summer cyclone enhanced biological productivity on the shelves // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 297–312. doi:10.1002/2013JC009301.
88. *Zenkevitch L.A.* Biology of the seas of the USSR. London: George Allen and Unwin Ltd., 1963. 953 p.
89. *Zhang J., Spitz Y.H., Steele M. et al.* Modeling the impact of declining sea ice on the Arctic marine planktonic ecosystem // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C10015. doi:10.1029/2009/JC005387.

The Estimation of Annual Kara Sea Primary Production

A. B. Demidov, S. V. Sheberstov, V. I. Gagarin

The estimation of phytoplankton, ice and under ice primary production (PP) of the Kara Sea and its regions was obtained using region-specific chlorophyll and PP algorithms and MODIS-Aqua data (2002–2015). Average phytoplankton PP for the growing season (from April to October) was equal to 165 mgC/m² per day. The annual phytoplankton PP was equal to 35 gC/m². The total Kara Sea phytoplankton PP was equal to 13 × 10¹² gC. The annual ice and under ice primary production (1.7 × 10¹² gC) was obtained using sea ice dynamics and integrated biophysical model published in the literature. This value is 12% of total Kara Sea PP. The results were compared with previous estimations of Kara Sea primary production. The increasing of PP due to Arctic warming and ice losses was discussed.