ОКЕАНОЛОГИЯ, 2020, том 60, № 5, с. 696–710

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 581.132:574.583

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ И ОЦЕНКА ЕЕ ГОДОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ. СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МОРЯМИ СИБИРСКОЙ АРКТИКИ

© 2020 г. А. Б. Демидов[1], *, В. И. Гагарин[1], С. В. Шеберстов[1]

[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

**e-mail: demspa@rambler.ru*

Поступила в редакцию 26.02.2020 г.
После доработки 21.05.2020 г.
Принята к публикации 22.06.2020 г.

Исследования сезонной изменчивости первичной продукции в столбе воды (ИПП) Восточно-Сибирского моря (ВСМ) и оценка ее годовых величин ($ПП_{тот}$) выполнены по данным сканера MODIS-Aqua, осредненным за 2002–2018 гг. Для этого впервые использованы региональные модели первичной продукции и хлорофилла. По среднемноголетним значениям ИПП в ВСМ выделены два контрастных по продуктивности района: Северо-Восточный и Юго-Западный. Сезонные изменения ИПП в Северо-Восточном районе характеризовались максимумом в июне (273 мгС/м^2 в день). В Юго-Западном районе максимум ИПП зарегистрирован в мае (311 мгС/м^2 в день). Для всей акватории ВСМ максимальные (273 мгС/м^2 в день) отмечены в июне. Интенсивность первичного продуцирования и $ПП_{тот}$ в Юго-Западном районе были, соответственно, в 1.8 и 2 раза выше, чем в Северо-Восточном районе. Среднее для моря значение ИПП составило 91 мгС/м^2 в день, а годовая $ПП_{тот}$ равнялась 9×10^{12} гС. Сравнение ИПП морей Сибирской Арктики показало уменьшение их продуктивности в направлении с запада на восток.

Ключевые слова: первичная продукция, сезонная изменчивость, годовая величина первичной продукции, дистанционное зондирование, MODIS-Aqua, Восточно-Сибирское море, моря Сибирской Арктики.

DOI: 10.31857/S0030157420050056

ВВЕДЕНИЕ

Первичная продукция фитопланктона (ПП) является ключевым компонентом пелагических экосистем. С ее величиной связано количество вещества и энергии во всех звеньях пищевой цепи [26, 42]. Будучи важнейшей частью, так называемого “биологического насоса”, ПП определяет поток органического вещества из слоя фотосинтеза в глубины океана и на дно [36, 45, 58]. Ее величина учитывается в расчетах обмена углекислого газа между океаном и атмосферой [33, 44, 60]. Долговременные изменения ПП могут служить одним из показателей климатической изменчивости [24, 25, 29, 35, 56, 59].

Сезонный цикл ПП является составной частью сукцессионных изменений сообществ фитопланктона в морях высоких и умеренных широт. Знания об этом цикле позволяют рассчитать годовую величину первичной продукции. Данные о сезонной изменчивости ПП могут быть получены в ходе проведения экспедиций в разные месяцы вегетационного сезона, по измерениям с помощью автономных буев либо с использованием спутниковой информации сканеров цвета океана. Во многих районах Арктического океана получение данных первыми двумя способами сопряжено со значительными трудностями, связанными с климатическими факторами и логистическими проблемами. В связи с этим спутниковая информация часто остается единственным источником получения сведений о долговременных изменениях ПП в крупном пространственно-временном масштабе. Следует отметить, что данные сканеров цвета океана, которые обеспечивают оптические характеристики, являются косвенными. Их пересчет в величины продукционных показателей, например, концентрацию хлорофилла “а” (Хл) и дальнейшее использование для оценки ПП фитопланктона требует разработки как можно более точных алгоритмов. Одним из путей повышения точности подобных расчетов является использование региональных моделей как Хл, так и ПП [41, 46].

Особенностями морей Сибирской Арктики (МСА), к которым относятся Карское море, море

Лаптевых и Восточно-Сибирское море (ВСМ), являются большая площадь континентального шельфа и огромный речной сток. Так, площадь шельфа этих морей в сумме составляет ~2.3×10^6 км^2 (~7% от площади шельфа Мирового океана). Объем стока наиболее крупных сибирских рек в МСА оценивается в 1.92×10^3 км^3 в год, что составляет приблизительно 70% от общего речного стока в Арктический океан [18, 57]. Эти два фактора способствуют формированию свойств водоемов второго оптического типа (Case II) [40] с превалирующей ролью растворенного и взвешенного органического вещества. Одним из подходов к совершенствованию оценок ПП является разработка эмпирических моделей продукционных параметров по данным, собранным непосредственно на этих акваториях. Для МСА в последние годы такие алгоритмы разработаны [13, 31] и применены для оценки годовых величин первичной продукции [6, 8].

Из всех морей Арктического океана ВСМ является самым неисследованным с точки зрения оценки его первичной продуктивности по экспедиционным данным [37, 50]. К настоящему времени на акватории Восточно-Сибирского моря выполнены единичные измерения ПП, преимущественно в начале осеннего сезона [4, 22, 38, 61]. О сезонных изменениях ПП Восточно-Сибирского моря можно судить лишь по работе [23]. В отличие от сезонной изменчивости, оценки годовой величины первичной продукции всего моря ($ПП_{тот}$) предпринимались неоднократно [1–3, 21, 23, 48, 52, 55]. Полученные в последнее время новые данные и разработанные подходы позволяют провести ревизию предыдущих представлений о продуктивности ВСМ.

Восточно-Сибирское моря является самым восточным из трех морей Сибирской Арктики. Ранее нами были проведены оценки годовой величины $ПП_{тот}$ Карского моря [6] и моря Лаптевых [8]. После проведения оценки $ПП_{тот}$ ВСМ представляет интерес сопоставление уровней продуктивности всех морей Сибирской Арктики, а также анализ влияния на них факторов среды.

Таким образом, целями настоящей работы являлись: (1) – описание сезонных изменений ПП и Хл Восточно-Сибирского моря; (2) – оценка годовой величины $ПП_{тот}$ Восточно-Сибирского моря; (3) – сравнение продуктивности морей Сибирской Арктики и анализ причин, вызывающих ее меридиональную изменчивость.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Экспедиционные данные и региональная модель первичной продукции. Для исследования сезонной изменчивости и оценки годовой величины ПП Восточно-Сибирского моря нами была применена простая продукционная модель, использующая в качестве входящих параметров величины концентрации Хл на поверхности ($Хл_0$) и фотосинтетически активной радиации (ФАР) [27]. При разработке данного алгоритма был использован подход, согласно которому коэффициенты модели принимаются как средние величины для региона исследования [49]. В качестве региональных коэффициентов модели выступают средние для ВСМ значения эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды (ψ) [32] и индекс вертикального распределения Хл (k). Эти коэффициенты рассчитываются по следующим формулам:

$$\psi = ДАЧ_{ср} / I_0,$$

где $ДАЧ_{ср}$ – среднее в слое фотосинтеза дневное ассимиляционное число (мгС/мг хл “а”), а I_0 – величина дневной подповерхностной ФАР (Ein/м^2).

$$k = Хл_{фс} / Хл_0,$$

где $Хл_{фс}$ – интегральное значение хлорофилла в слое фотосинтеза.

Средние величины этих параметров получены по данным 63 и 69-го рейсов НИС “Академик Мстислав Келдыш”, проведенных, соответственно в восточной части моря Лаптевых (14 станций) и ВСМ (10 станций) в сентябре 2015 и 2017 гг. [4, 5].

Формула расчета первичной продукции в столбе воды (ИПП) имеет вид

$$ИПП = \psi k Хл_0 I_0.$$

Распределение произведения ψk имеет логнормальный вид [31], поэтому целесообразно использовать его среднюю геометрическую величину [19]. Эта величина была рассчитана по данным 24-х станций Для всей акватории ВСМ она равняется 7.62. Таким образом, итоговое уравнение модели имеет вид

$$IPP = 7.62 Хл_0 I_0,$$

Региональная модель хлорофилла. Известно, что стандартный алгоритм MODIS завышает величины концентрации $Хл_0$ в водах второго оптического типа [напр., 40]. Поэтому, для более точного расчета $Хл_0$ следует использовать региональный алгоритм. К сожалению, из-за недостатка данных такого алгоритма для ВСМ не существует. Тем не менее, максимально уменьшить погрешность между спутниковыми и натурными данными по концентрации $Хл_0$ в ВСМ можно, применив региональную модель, разработанную для наиболее близкого по оптическим свойствам водоема, каковым является Карское море. Таким образом, в настоящей работе нами была использована регрессионная модель $Хл_0$, разработанная ранее для Карского моря [13], где наилучшая кор-

реляция измеренных и расчетных величин Хл ($R^2 = 0.47$; $N = 185$) была получена при использовании отношения коэффициентов спектральной яркости моря $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$:

$$\ln(\mathrm{Chl}_0) = -3.66\ln(R_{rs}(531)/R_{rs}(547)) + 0.116.$$

Региональные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла в российских морях в последнее время широко используются для восстановления этого показателя по спутниковым данным [15, 16, 43].

Спутниковые данные и расчет среднемесячных и среднегодовых значений. Данные сканера цвета океана Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS-Aqua) L2 уровня за период с 2002 по 2018 гг., были получены с сайта National Aeronautics and Space Administration (NASA) www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/ в границах ВСМ, которые были приняты в одной из предыдущих работ по оценке первичной продукции Арктического океана [37].

Температурные файлы OI SST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) с пространственным разрешением 0.25° × 0.25° и усредненные за 1 день скачивались с сайта ftp://ftp.solab.rshu.ru/data/allData/OISST-AVHRR-AMSR-V2. При создании этих файлов использовались данные датчиков Advanced Very-High-Resolution Radiometer (AVHRR) на спутниках National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), а также судовые данные и данные метеорологических буев [54].

Площадь акватории покрытой льдом рассчитывалась по первичным данным, полученным с сайта ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202_v2/north/daily [30]. При расчете первичной продукции фитопланктона свободной ото льда считалась акватория, если площадь ледового покрытия была <15% [28]. Большая часть акватории ВСМ покрыта льдом приблизительно с конца октября до середины апреля. По этой причине и вследствие большого количества дней со сплошной облачностью в октябре и апреле спутниковыми наблюдениями охвачена незначительная площадь моря. Поэтому результаты расчетов по доступным спутниковым данным были экстраполированы на акватории, которые могли бы быть открыты для сканера цвета в отсутствие облачности.

Все спутниковые данные были обработаны с помощью программного обеспечения, разработанного в ИО РАН [17]. Значения $R_{rs}(\lambda_i)$ были перечитаны в величины концентрации Хл_0 по региональному алгоритму (см. выше). Данные по ФАР использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua [34]. Основные подходы к обработке спутниковых данных были неоднократно описаны ранее при исследовании долговременной изменчивости и оценках ПП морей Карского и Лаптевых [6–9].

Среднемесячные значения исследуемых параметров были получены путем осреднения последовательно для каждого месяца отдельного года в период с 2002 по 2018 гг. Затем проводился расчет среднемноголетних величин для каждого месяца с апреля по октябрь. Далее был проведен расчет среднемноголетних величин, которые были получены осреднением всего массива данных 2002–2018 гг. за вегетационный сезон. Для Хл_0, ФАР и температуры поверхности воды (T_0) осреднение проводилось для периода с апреля по октябрь (214 дней). Из-за отсутствия совпадающих во времени и пространстве величин Хл_0 и ФАР в апреле величины ИПП для этого месяца рассчитать невозможно. Поэтому значения этого показателя усреднялись для периода с мая по октябрь (184 дня). Среднемноголетнее значение $\text{ПП}_{\text{тот}}$ рассчитывалось умножением среднемноголетней величины на площадь исследуемой акватории.

Районирование Восточно-Сибирского моря. Исследования сезонной изменчивости первичной продукции, хлорофилла и абиотических факторов, а также оценка годовых величин ПП были проведены для всего моря и его двух районов, отличающихся уровнем продуктивности (рис. 1). В ВСМ нами были выделены Северо-Восточный и Юго-Западный районы. Граница между этими районами была проведена согласно среднемноголетнему летнему положению изогалины 25 psu [11, 53], которое принято считать разделом между распресненными и морскими водами [20]. Такой подход к районированию обусловлен тем, что в морях Сибирской Арктики условия формирования первичной продукции в районах внутреннего шельфа, находящихся под влиянием речного стока, и акваторий внешнего шельфа, не подверженных этому влиянию, резко отличаются. Следствием этого являются их отличия в уровне продуктивности [6, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Среднемноголетние величины первичной продукции в Восточно-Сибирском море. Картина пространственного распределения ИПП ВСМ после осреднения массива спутниковых данных за 2002–2018 гг. представлена на рис. 1. Среднемноголетние величины ИПП уменьшались в направлении с юга-запада на северо-восток. Максимальные значения (>150 мгС/м^2 в день) были отмечены у побережий в местах впадения рек, а минимальные (<50 мгС/м^2 в день) у северо-восточной границы моря. Усредненные за 17 лет величины первичной продукции в Юго-Западном районе оказались в 1.8 раза выше, чем в Северо-Восточном (табл. 1). Средние величины ИПП до-

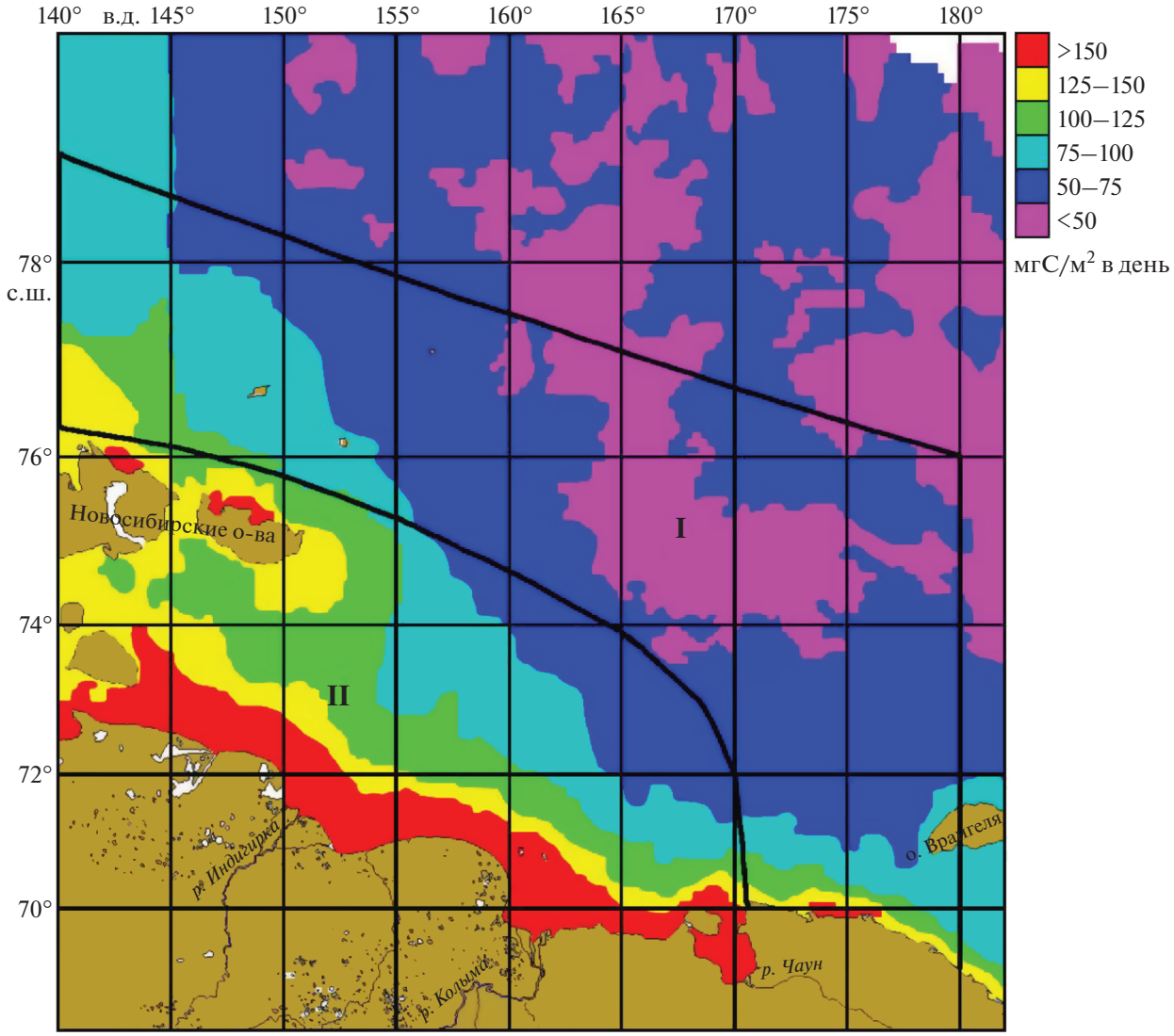

Рис. 1. Первичная продукция в Восточно-Сибирском море, осредненная по данным сканера MODIS-Aqua за 2002–2018 гг. I – Северо-Восточный район; II – Юго-Западный район. Границы моря приведены, согласно [37].

стоверно отличались по *t*-критерию Стьюдента ($p < 0.05$).

Сезонные изменения первичной продукции и хлорофилла. В Северо-Восточном районе величина ИПП возрастала с мая по июнь (рис. 2а), когда был отмечен ее максимум (273 мгС/м^2 в день) (табл. 2). Начиная с июня происходило уменьшение среднемноголетнего значения ИПП до минимального (21 мгС/м^2 в день), отмеченного в октябре. Таким образом, в течение года ИПП изменялась более чем на порядок (в 13 раз). Концентрация Хл$_0$ незначительно увеличивалась с апреля по июнь (в 1.14 раза). С июня по август происходило уменьшение этого показателя в 1.2 раза. Далее к концу вегетационного сезона среднемноголетнее значение Хл$_0$ возросло в 1.5 раза. В целом в течение года вариабельность величин концентрации Хл на поверхности составила 1.4 раза.

В Юго-Западном районе отсутствуют данные по ИПП для апреля (рис. 2б). Среднемноголетние величины ИПП в этом районе ВСМ были максимальными в мае (311 мгС/м^2 в день), варьировали меньше, чем в Северо-Восточном районе (в 10.4 раза) и уменьшались к октябрю (табл. 2). Содержание Хл$_0$ в целом постоянно увеличивалось с апреля по октябрь. Общая вариабельность этого показателя в течение вегетационного сезона была приблизительно такой же, как и в Северо-Восточном районе моря (1.5 раза).

В масштабе всего моря (рис. 2в) максимальное среднемноголетнее значение ИПП зарегистрировано в июне (273 мгС/м^2 в день). Следует отметить, что близкая, 251 мгС/м^2 в день, величина

Таблица 1. Первичная продукция в столбе воды в Восточно-Сибирском море, осредненная за 2002–2018 гг.

Район		Площади районов (S)			ПП районов			
		км^2	% от Σ S	средний за вегетационный сезон % S, свободной ото льда	мгС/м^2 в день	гС/м^2 в год	ТгС в год ($ПП_{тот}$)	% от $ПП_{тот}$
Северо-Восточный		488367	51	38 ± 10	68 ± 22	13	3	33
Юго-Западный		467722	49	46 ± 7	120 ± 39	22	6	67
Все море	S	956089	100	42 ± 10				
	ПП				91 ± 40	17	9	100

Примечание. Представлены средние арифметические величины и стандартное отклонение.

Таблица 2. Статистика сезонных изменений первичной продукции в столбе воды и хлорофилла “а” на поверхности в различных районах Восточно-Сибирского моря в период 2002–2018 гг.

Месяц	Район					
	Северо-Восточный		Юго-Западный		все море	
	ИПП	$Хл_0$	ИПП	$Хл_0$	ИПП	$Хл_0$
Апрель	Нет данных	0.76 ± 0.13 / 771	Нет данных	0.76 ± 0.13 / 1124	Нет данных	0.76 ± 0.13 / 1895
Май	156 ± 9 / 8	0.82 ± 0.19 / 1741	311 ± 78 / 13	0.84 ± 0.25 / 2125	251 ± 98 / 21	0.83 ± 0.23 / 3866
Июнь	273 ± 65 / 589	0.87 ± 0.21 / 3511	273 ± 92 / 659	0.94 ± 0.25 / 4090	273 ± 82 / 1248	0.91 ± 0.24 / 7601
Июль	174 ± 41 / 5447	0.79 ± 0.17 / 6099	241 ± 64 / 4359	1.08 ± 0.26 / 4438	206 ± 63 / 9806	0.92 ± 0.26 / 10537
Август	103 ± 22 / 6101	0.72 ± 0.11 / 6101	174 ± 43 / 4436	1.08 ± 0.25 / 4441	135 ± 48 / 10537	0.88 ± 0.26 / 10542
Сентябрь	48 ± 12 / 6102	0.74 ± 0.12 / 6103	86 ± 24 / 4444	1.07 ± 0.24 / 4445	65 ± 27 / 10546	0.89 ± 0.25 / 10548
Октябрь	21 ± 6 / 6093	1.08 ± 0.32 / 6100	30 ± 10 / 4443	1.13 ± 0.15 / 4447	25 ± 9 / 10536	1.11 ± 0.26 / 10547

Примечание. ИПП – первичная продукция в столбе воды (мгС/м^2 в день); $Хл_0$ – концентрация хлорофилла “а” на поверхности (мг/м^3). В числителе приведены средняя арифметическая величина и стандартное отклонение, в знаменателе – количество пикселей, по которым проводилось осреднение.

ИПП зарегистрирована в мае. Резкое уменьшение ИПП (в 11 раз) наблюдается с июня по октябрь. На всей акватории ВСМ значения $Хл_0$ возрастали с апреля по июнь в 1.2 раза. В июне–сентябре содержание Хл на поверхности в среднем практически не изменялось (0.88–0.92 мг/м^3). В октябре значение $Хл_0$ возросло в 1.25 раза по сравнению с сентябрем (табл. 2). Для всего вегетационного сезона увеличение $Хл_0$ составило 1.5 раза.

Сезонный ход рассчитанной на площадь районов и всего моря первичной продукции ($ПП_{тот}$) (рис. 3) характеризовался увеличением значений с мая по август и их снижением к концу вегетационного сезона. Максимум $ПП_{тот}$ был сдвинут на 2–3 месяца относительно кривой ИПП из-за увеличивающейся в течение года площади моря, свободной ото льда.

Сезонные изменения ФАР, температуры воды и площади ледового покрытия. Во всех районах и для ВСМ в целом зарегистрирован идентичный сезонный ход ФАР (рис. 4). Ее значения возрастали с начала вегетационного сезона в апреле, имели резкий максимум в июне и снижались к октябрю. Среднемноголетние величины ФАР, поверхностной температуры и площади ледового покрытия

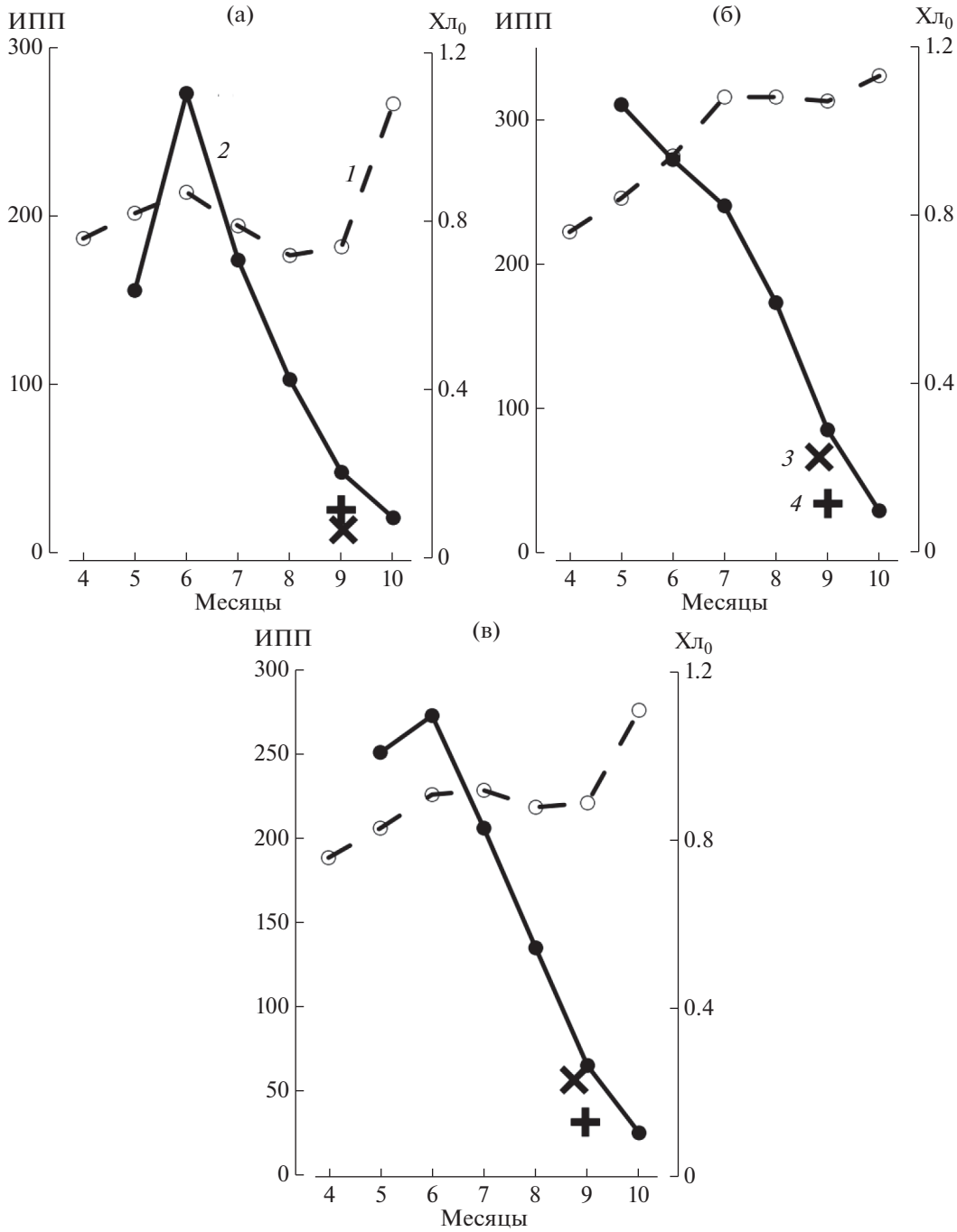

Рис. 2. Сезонные изменения содержания хлорофилла “а” на поверхности ($Хл_0$, мг/м^3) – *1* и интегральной первичной продукции (ИПП, мгС/м^2 в день) – *2* в различных районах Восточно-Сибирского моря по данным сканера MODIS-Aqua, осредненные за 2002–2018 гг. Для сравнения представлены средние данные полевых наблюдений $Хл_0$ – *3* (косой крестик) и ИПП – *4* (прямой крестик) за сентябрь 2017 г. (а) – Северо-Восточный район; (б) – Юго-Западный район; (в) – все море.

приведены в табл. 3. При похожем с ФАР ходе сезонных изменений T_0 максимум ее значений был смещен на июль–август. Площадь ледового покрытия закономерно уменьшалась в период таяния с апреля по сентябрь и начинала возрастать с началом ледостава в октябре.

Годовые величины первичной продукции Восточно-Сибирского моря. Среднемесячные значения ИПП позволяют рассчитать $ПП_{тот}$ в различных районах и для моря в целом. При близких значениях площадей (табл. 1), $ПП_{тот}$ в Юго-Западном районе оказалась в 2 раза выше, чем в Се-

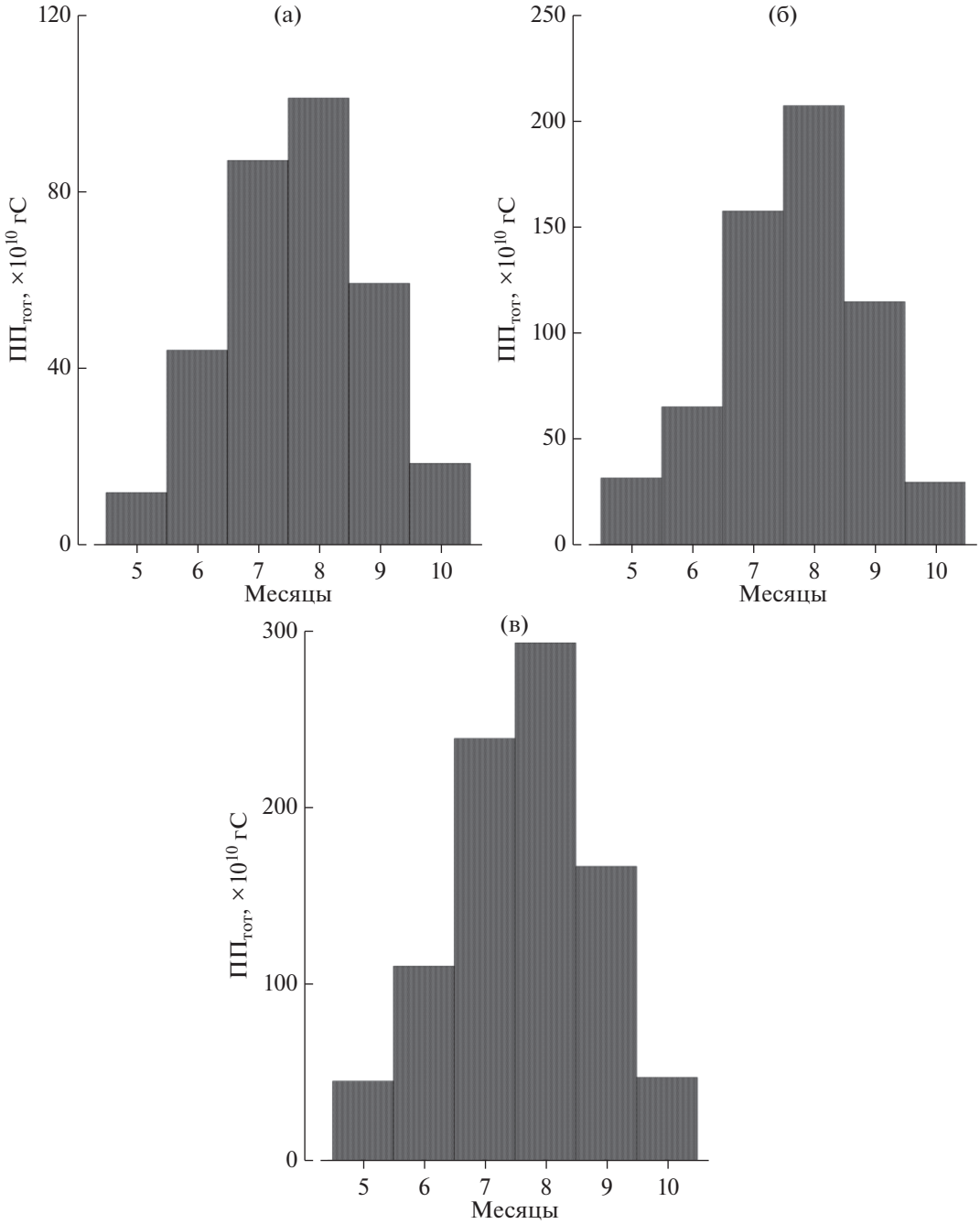

Рис. 3. Сезонные изменения величин первичной продукции фитопланктона (ПП$_{тот}$) в различных районах Восточно-Сибирского моря. (а) – Северо-Восточный район; (б) – Юго-Западный район; (в) – все море.

веро-Восточном соответственно 6 и 3 ТгС в год. Годовая величина первичной продукции ВСМ оказалась равной 9 ТгС в год. При этом доля Северо-Восточного района в общей ПП моря составляет 33%, а доля Юго-Западного района – 67%.

Результаты сравнения первичной продуктивности морей Сибирской Арктики. Среднемноголетние величины ИПП в МСА убывали с запада на восток, ИПП Карского моря (165 мгС/м^2 в день) оказалась статистически значимо (t – критерий Стьюдента, $p < 0.05$) в 1.81 раза выше, чем в ВСМ (91 мгС/м^2 в день). При этом среднемноголетние величины концентрации Хл на поверхности в МСА изменялись незначительно, от 0.92 мг/м^3 в ВСМ до 1.04 мг/м^3 в море Лаптевых (рис. 5а).

Максимальная годовая величина ПП$_{тот}$ (13 ТгС) рассчитана для Карского моря [6]. Значения этого параметра также уменьшались к востоку.

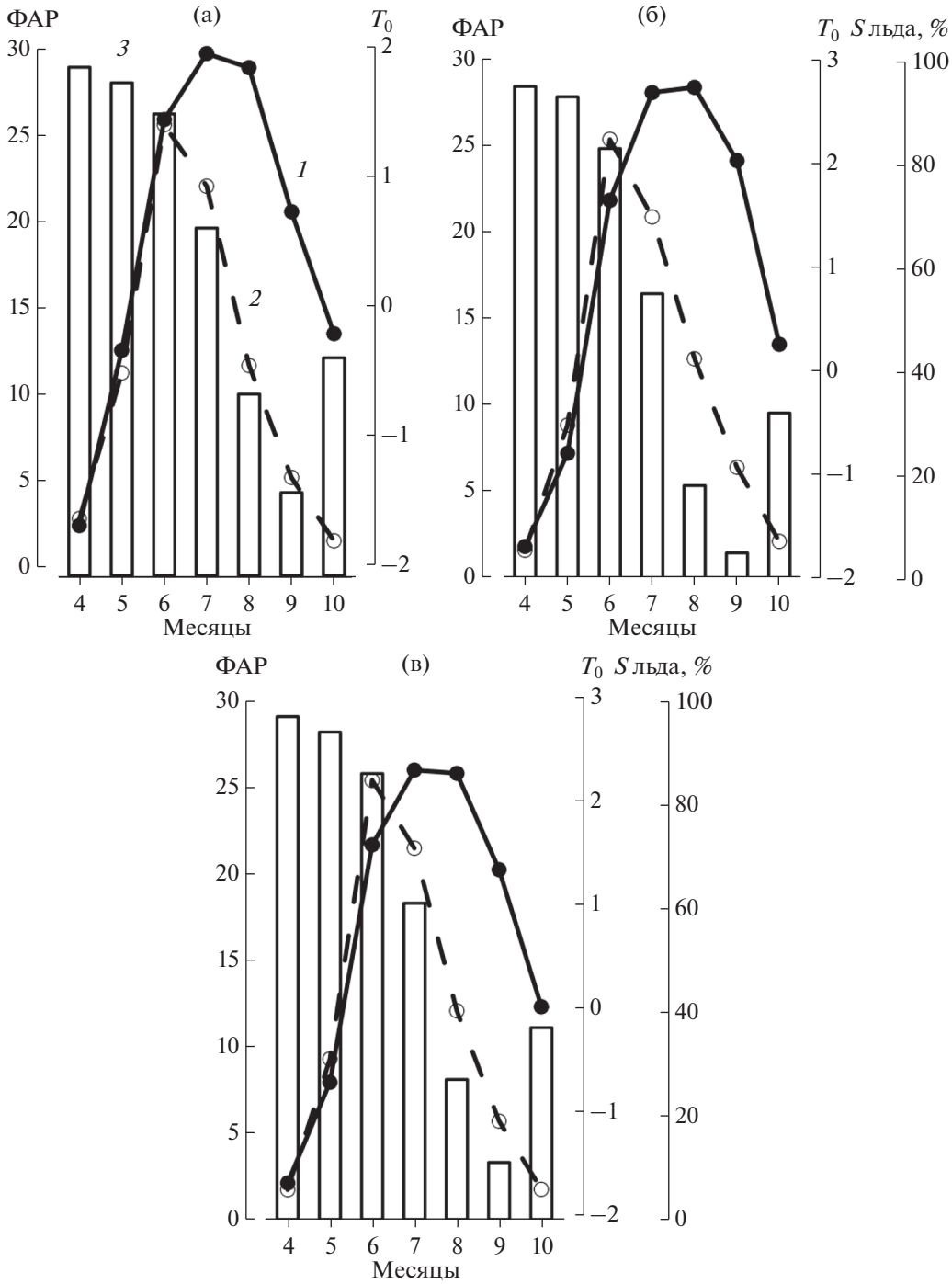

Рис. 4. Сезонные изменения температуры воды на поверхности (T_0, °C) – *1*, фотосинтетически активной радиации (ФАР, моль квантов /м^2 в день) – *2* и площади моря, покрытой льдом (S, % от площади акватории района) – *3* в различных районах Восточно-Сибирского моря по спутниковым данным (см. раздел "Материал и методы"). (а) – Северо-Восточный район; (б) – Юго-Западный район; (в) – все море.

Практически одинаковые величины ПП$_{тот}$ для моря Лаптевых (8 ТгС) [8] и ВСМ (9 ТгС) при снижении ИПП в 1.37 в последнем из упомянутых водоеме объясняется большей в 1.7 раза площадью ВСМ (рис. 5б).

Среднемноголетний уровень ФАР в Карском море был в 1.12 раз выше, чем в море Лаптевых и в 1.18 выше, чем в ВСМ. Уровни ФАР в море Лаптевых и ВСМ различались в 1.05 раза. Одним из параметров, определяющих величину ПП$_{тот}$, явля-

Таблица 3. Статистика сезонных изменений абиотических факторов, определяющих динамику первичной продукции в Восточно-Сибирском море: фотосинтетически активной радиации, температуры воды на поверхности и площади ледового покрова

Месяц	Район								
	Северо-Восточный			Юго-Западный			все море		
	ФАР	T_0	S льда	ФАР	T_0	S льда	ФАР	T_0	S льда
Апрель	2.9 ± 0.7 / 9	–1.69 ± 0.06 / 18	98 ± 2 / 6141	1.7 ± 0.6 / 58	–1.69 ± 0.07 / 139	95 ± 10 / 4692	1.8 ± 0.8 / 67	–1.69 ± 0.07 / 157	97 ± 7 / 10833
Май	11.3 ± 4.7 / 21	–0.34 ± 1.16 / 39	95 ± 4 / 6141	8.9 ± 8.5 / 81	–0.79 ± 1.02 / 203	93 ± 10 / 4692	9.4 ± 7.9 / 102	–0.72 ± 1.06 / 242	94 ± 7 / 10833
Июнь	25.7 ± 4.5 / 736	1.44 ± 0.73 / 876	89 ± 9 / 6141	25.4 ± 5.3 / 885	1.65 ± 1.09 / 1107	83 ± 11 / 4692	25.5 ± 5.0 / 1621	1.57 ± 0.97 / 1983	86 ± 10 / 10833
Июль	22.1 ± 2.7 / 5963	1.95 ± 1.14 / 6069	67 ± 15 / 6141	20.9 ± 2.0 / 4394	2.69 ± 1.31 / 4625	55 ± 12 / 4692	21.6 ± 2.4 / 10357	2.29 ± 1.28 / 10694	61 ± 15 / 10833
Август	11.8 ± 1.3 / 6101	1.84 ± 0.72 / 6140	35 ± 16 / 6141	12.7 ± 1.0 / 4441	2.74 ± 0.73 / 4661	18 ± 1 / 4692	12.2 ± 1.3 / 10542	2.26 ± 0.85 / 10801	27 ± 15 / 10833
Сентябрь	5.3 ± 1.2 / 6103	0.73 ± 0.86 / 6140	16 ± 12 / 6141	6.5 ± 0.9 / 4451	2.03 ± 0.87 / 4661	5 ± 5 / 4692	5.8 ± 1.2 / 10554	1.33 ± 1.08 / 10801	11 ± 11 / 10833
Октябрь	1.6 ± 0.5 / 6103	–0.21 ± 0.42 / 6140	42 ± 19 / 6141	2.2 ± 0.7 / 4450	0.26 ± 0.48 / 4661	32 ± 9 / 4692	1.9 ± 0.6 / 10553	0.01 ± 0.50 / 10801	37 ± 16 / 10833

Примечание. ФАР – подповерхностная фотосинтетически активная радиация (моль квантов/м^2 в день); T_0 – температура воды на поверхности (°C); S льда – площадь ледового покрова в % от площади акватории. В числителе приведены средняя арифметическая величина и стандартное отклонение, в знаменателе – количество пикселей, по которым проводилось осреднение.

ется площадь ледового покрытия. Ее среднемноголетние значения незначительно увеличивались с запада на восток, от 51% в Карском море до 58% в ВСМ (рис. 5в).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сезонные изменения продукционных параметров и факторов среды. Картина сезонных изменений ИПП в Восточно-Сибирском море в целом похожа на изменчивость этого показателя в других морях Сибирской Арктики [8, 10]. Эту картину определяют время освобождения акватории ото льда, изменения в течение года уровня ФАР, концентрации биогенных элементов и стратификации водного столба [55]. В МСА к этим абиотическим факторам следует добавить сезонную динамику речного стока, который оказывает большое влияние на поступление биогенных элементов в эвфотический слой [39, 47]. Результаты сравнения рис. 2 и 4 показывают, что максимальные величины ИПП в течение года совпадают с максимальным уровнем ФАР. Следует отметить, что такой эффект достигается отчасти тем, что ФАР непосредственно входит в модельную формулу расчета ИПП (см. раздел Материал и методы).

Другой показатель, на который опираются модельные расчеты ИПП – концентрация Хл$_0$. Анализ сезонных изменений ИПП и Хл$_0$ позволяет прийти к двум заключениям. Во-первых, сезонная динамика Хл$_0$ выражена очень слабо. Во-вторых, сезонный ход кривых ИПП и Хл$_0$ отличается очень сильно, а максимальные значения этих показателей не совпадают во времени (рис. 2). К таким же выводам мы пришли ранее при исследовании сезонных изменений этих параметров в Карском море [10] и море Лаптевых [8].

Следует отметить, что данные полевых наблюдений в наиболее исследованном из МСА Карском море также показывают незначительную сезонную динамику Хл$_0$ (табл. 4). Среди причин, вызывающих несоответствие между сезонными изменениями ИПП и Хл$_0$, следует упомянуть высокую роль фотофизиологических параметров и ФАР и незначительный вклад биомассы фитопланктона в формирование первичной продукции, ошибки модельных расчетов этого параметра при завышении концентрации Хл$_0$ региональным алгоритмом, а также эффект пространственно-временного осреднения. Обращает на себя внимание тенденция к увеличению концентрации Хл$_0$ к концу вегетационного сезона (рис. 2), что

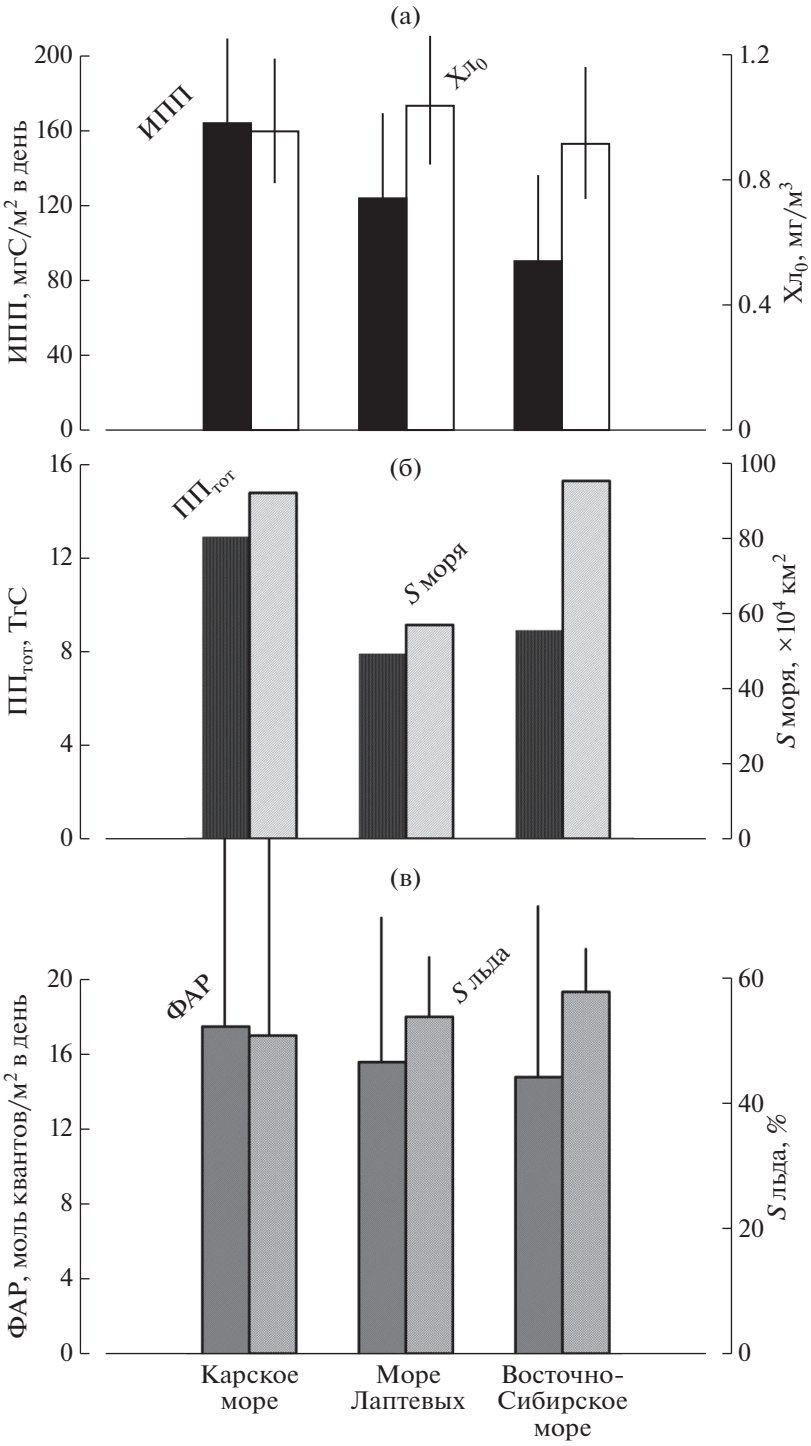

Рис. 5. Среднемноголетние величины интегральной первичной продукции (ИПП), содержания хлорофилла “а” на поверхности ($Хл_0$) – (а); годовой первичной продукции фитопланктона ($ПП_{тот}$) – (б); фотосинтетически активной радиации (ФАР) и площади ледового покрытия (*S* льда) – (в) в морях Сибирской Арктики. Их площадь в границах согласно [37] (*S* моря) показана на панели (б). Вертикальные отрезки – величина стандартного отклонения.

гипотетически можно объяснить накоплением биомассы фитопланктона в течение года при уменьшении скорости выедания.

Среднемесячные величины ИПП (табл. 2) характеризуют все исследованные районы Восточно-Сибирского моря как мезотрофные (100–500 мгС/м^2 в день) с мая по август и олиготрофные (<100 мгС/м^2 в день) в конце (сентябрь, октябрь) вегетационного сезона [12]. Следует отметить, что максимальные величины ИПП во вре-

Таблица 4. Сезонные изменения концентрации хлорофилла “а” на поверхности ($Хл_0$) в Карском море по экспедиционным данным

Месяц	$Хл_0$, мг/м^3			
	min	max	*Me*	*N*
Март	0.16	3.22	0.33	5
Апрель	0.11	9.48	0.27	9
Июль	0.03	41.4	0.48	89
Август	0.06	17.7	0.37	78
Сентябрь	0.02	21.7	0.72	170
Октябрь	0.09	0.87	0.43	14

Примечание. При осреднении в марте и апреле использованы данные из работы [14]; июль–октябрь – наши данные; min и max – границы диапазона изменчивости; *Me* – медиана; *N* – количество измерений.

мя вегетационного сезона невелики, от 311 мгС/м^2 в день в Юго-Западном районе до 273 мгС/м^2 в день в Северо-Восточном районе и для всего моря (табл. 2). Причины невысоких значений ИПП в ВСМ, как и в остальных морях Сибирской Арктики, заключаются в ее лимитировании практически всеми абиотическими факторами (короткий вегетационный сезон, большие площади ледового покрова, резкая стратификация водного столба в районах впадения рек, что затрудняет конвекцию и поступление биогенных элементов в зону фотосинтеза, а также низкие надводная и подводная освещенность и температура) [4]. Поступление биогенных элементов с речным стоком, по-видимому, не может компенсировать их недостаточный поток из глубины в результате зимней конвекции. Известно, что реки, впадающие в Арктический океан, в целом бедны растворенными минеральными веществами по сравнению с другими реками Земли [51].

Тем не менее, речной сток Индигирки и Колымы, который снабжает Юго-Западный район аллохтонным минеральным и органическим веществом является одной из причин его повышенной продуктивности по сравнению с Северо-Восточным районом (табл. 1 и 2). Уровень первичной продукции в этих районах достоверно различался почти в два раза. Другими причинами различий ИПП в этих районах в более высоком содержании $Хл_0$ на юго-западе моря, а также том, что с июня по октябрь уровень ФАР и T_0 в Юго-Западном районе в среднем выше, чем в Северо-Восточном (табл. 3).

Оценки годовых величин первичной продукции ВСМ. Существуют довольно многочисленные данные по годовой величине первичной продукции Восточно-Сибирского моря [1–3, 21, 23, 37, 48, 52, 55]. Этими авторами проводились оценки годовой $ПП_{тот}$ ВСМ в пределах его географических границ, либо для так называемого “сектора Восточно-Сибирского моря”, куда попадали акватории центрального Арктического бассейна, а часть площади моря, наоборот, не учитывалась [52]. Кроме этого, сопоставление результатов нашей оценки с литературными данными затруднено из-за разного периода осреднения и различий в выборе продолжительности вегетационного сезона. По всей видимости, разные границы вегетационного сезона вносят наименьший вклад в вариабельность оценки годовой $ПП_{тот}$. Как показано в табл. 5, вклад мая и октября в годовую первичную продукцию составляет в сумме всего 10%.

К настоящему времени существует мало данных о сезонных изменениях ИПП Восточно-Сибирского моря [23]. При сравнении с литературным источником выявляются различия в картине сезонной изменчивости ИПП. Так, максимум этого показателя приходится в работе [23] на июль, в то время, как в настоящей работе это май–июнь. По сравнению с результатами, приведенными в работе [23], в мае и июне рассчитанные нами значения ИПП выше в 1.9–6.0 раза, в то время как в июле–сентябре они ниже в 1.7–3.4 раза.

Различные оценки $ПП_{тот}$ ВСМ приведены в табл. 6. Превышение результатов разных авторов по сравнению с нашими данными при оценке $ПП_{тот}$ составило от 1.3 до 7.9 раз. Причины таких расхождений обсуждались нами ранее при оценках годовых величин ПП Карского моря и моря Лаптевых [6, 8]. Кратко они заключаются в несовпадении у разных авторов площадей моря и использовании разных моделей первичной продукции и хлорофилла. Обсуждение преимуществ и недостатков различных моделей не является зада-

Таблица 5. Доля (%) первичной продукции фитопланктона в различные месяцы вегетационного сезона в суммарной годовой первичной продукции Восточно-Сибирского моря

Район	Месяц					
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Северо-Восточный	4	14	27	31	18	6
Юго-Западный	5	11	26	34	19	5
Все море	5	12	27	33	18	5

Таблица 6. Оценки годовой величины первичной продукции Восточно-Сибирского моря

Источник	Период осреднения (годы)	Вегетационный сезон (месяцы)	Границы моря	Годовая первичная продукция, ТгС
[3]	Использованы полевые данные до конца 80-х гг. XX в.	Экстраполяция результатов, полученных в летне-осенний период на весь вегетационный сезон	Географические	14
[2]	1978–1986	Май–сентябрь	Географические	10–15
[1]	2003–2012	Апрель–октябрь	Географические	8–16
[21]	1998–2012	Май–сентябрь	Секторальные	38.5
[55]	Использованы полевые данные до конца 90-х гг. XX в.	Экстраполяция результатов, полученных в летне-осенний период на весь вегетационный сезон	Географические	(с учетом продукции ледовых водорослей) 30
[52]	1998–2006	Апрель–октябрь	Секторальные	18*
[48]	2003–2013	Неизвестен	Географические	71**
[23]	1998–2010	Май–сентябрь	Географические	17***
Наши данные	2002–2018	Апрель–октябрь	Географические	9

* Нами произведен приблизительный расчет средней величины за 1998–2006 гг. по данным авторов.
** Нами рассчитана приблизительная средняя величина за 2003–2013 гг. по данным авторов.
*** Приблизительный расчет годовой величины первичной продукции ($ПП_{тот}$) произведен нами по средним дневным величинам за период с мая по сентябрь, приведенным авторами.

чей данной статьи. В настоящее время большинство продукционных моделей работает в Арктическом океане со значительными ошибками [46]. Одним из путей их совершенствования является региональный подход, который мы предлагаем в настоящей работе. Кроме этого, эмпирический алгоритм, использованный нами, позволяет опираться непосредственно на данные полевых измерений первичной продукции. В этом мы видим преимущества нашего подхода к оценке $ПП_{тот}$ Восточно-Сибирского моря. Данные полевых наблюдений говорят о низком уровне ПП в ВСМ [4, 22, 38, 61]. Очевидно, с этим связана полученная нами самая низкая оценка $ПП_{тот}$ ВСМ по сравнению с предыдущими исследованиями (табл. 6). Кроме этого, мы считаем нашу оценку завышенной. К этому выводу приводит сравнение средних данных натурных измерений и спутниковых наблюдений (рис. 2). Так, в сентябре для различных районов и ВСМ в целом превышение ИПП, рассчитанной по модельным и спутниковым данным, над измеренными значениями составило 1.7–3.1 раза, а превышение спутникового Хл над результатами, полученными в экспедициях, 3.8–6.2 раза. Кроме этого, сравнение средних за вегетационный сезон значений содержания спутникового и экспедиционного $Хл_0$ для наиболее изученного Карского моря (табл. 4 и рис. 5а) позволяет сделать вывод о том, что только по этому параметру использованная продукционная модель может завышать величину ИПП приблизительно в 2 раза.

Продуктивность морей Сибирской Арктики в связи с факторами среды. Сравнение $ПП_{тот}$ МСА показало, что наиболее продуктивным является расположенное на западе этого региона Карское море (рис. 5б). Если проводить сравнение с работами, где использовались спутниковые данные и продукционные модели, то аналогичный результат был получен в работах [1, 2, 21, 52], а в работах [23, 48] наиболее продуктивными из морей Сибирской Арктики оказались соответственно море Лаптевых и ВСМ.

Величина $ПП_{тот}$ зависит от нормированной на площадь акватории первичной продукции (ИПП) и размера этой акватории. Для морей Арктического океана для расчета $ПП_{тот}$ решающее значение имеет величина свободной ото льда акватории. На рис. 5а видно, что максимальное среднемноголетнее значение ИПП зарегистрировано в Карском море. В восточном направлении величины этого параметра снижаются, а близкие значения $ПП_{тот}$ моря Лаптевых и ВСМ объясняются бóльшей приблизительно в 2 раза площадью акватории последнего. Уменьшению $ПП_{тот}$ в восточном направлении способствует увеличение среднемноголетней площади ледового покрытия от Карского моря до ВСМ (рис. 5в).

Из принятой нами модели расчета ИПП (см. раздел Материал и методы) следует, что изменчивость этого показателя зависит от концентрации Хл на поверхности, ФАР и величины эмпирического коэффициента ($k\psi$). Сравнение формул расчета

ИПП, использованных для Карского моря [6], моря Лаптевых [8] и ВСМ (наст. работа) показывает, что величина этого коэффициента изменяется от 7.62 (ВСМ) до 7.95 (море Лаптевых) и 8.27 (Карское море) и изменяет ИПП в 1.04–1.08. На рис. 5а видно, что среднемноголетние значения $Хл_0$ слабо варьировали между различными морями Сибирской Арктики, изменяясь от 0.96 мг/м^3 в Карском море и 1.04 мг/м^3 в море Лаптевых до 0.94 мг/м^3 в ВСМ. Незначительное варьирование в МСА отмечено нами также для среднемноголетнего уровня ФАР (рис. 5в). Величины этого показателя слабо уменьшались в восточном направлении от 17.6 моль квантов/м^2 в день в Карском море и 15.7 моль квантов/м^2 в день в море Лаптевых до 14.9 моль квантов/м^2 в день в ВСМ. Следует отметить, что МСА располагаются в одних географических широтах и получают примерно равное количество солнечной радиации в течение года [23, 53]. В настоящей работе учитывалась ФАР, приходящая на поверхность моря, которая свободна ото льда. Поэтому, увеличение среднемноголетней площади ледового покрытия в направлении с запада на восток могло способствовать уменьшению ФАР в расчетах ИПП. Таким образом, уменьшение ИПП в направлении с запада на восток можно объяснить уменьшением коэффициентов модели и уровня ФАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что к настоящему времени мы имеем далеко не полные представления о сезонном цикле первичной продукции в МСА. Это связано с отсутствием полевых данных для начала вегетационного сезона (апрель–июнь) и недостаточностью экспериментальных исследований в другие месяцы года. Существующие модели первичной продукции и хлорофилла нуждаются в совершенствовании. Пути улучшения этих моделей и, как следствие, оценок годовой величины первичной продукции авторы видят в получении новых натурных данных по параметрам первичной продуктивности региона. Это, прежде всего, фотофизиологические показатели функционирования сообществ фитопланктона, которые являются входящими параметрами продукционных моделей. Улучшение использования спутниковой информации видится в разработке и совершенствовании региональных алгоритмов расчета. Применение регионального подхода является перспективным, так как он учитывает специфику связей продукционных параметров фитопланктона с факторами среды в оптически сложных водах, к которым принадлежат моря Сибирской Арктики.

Благодарности. Авторы благодарят GSFC DAAC (Goddard Space Flight Center, Distributed Active Archive Center) NASA за возможность использования спутниковой информации сканера MODIS-Aqua, NODC (National Oceanographic Data Center) NOAA за предоставленные данные по температуре воды на поверхности, а также NSIDC (National Snow and Ice Data Center) NOAA за данные по площади ледового покрытия.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0149-2019-0008. Экспедиционные исследования проведены при финансовой поддержке Гранта РФФИ “Арктика” № 18-05-60069.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Виноградов М.Е., Ведерников В.И., Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Компоненты цикла углерода а Арктических морях России. Первичная продукция и поток $С_{орг}$ из фотического слоя // Океанология. 2000. Т. 40 № 2. С. 221–233.
3. *Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С. и др.* Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.
4. *Демидов А.Б., Гагарин В.И.* Первичная продукция и условия ее формирования в Восточно-Сибирском море в осенний период // Докл. АН. 2019. Т. 487. № 6. С. 696–700. https://doi.org/10.31857/S0869-56524876696-700
5. *Демидов А.Б., Гагарин В.И., Арашкевич Е.Г. и др.* Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в море Лаптевых в августе–сентябре // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 755–770. https://doi.org/10.31857/S0030-1574595755-770
6. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И.* Оценка годовой величины первичной продукции Карского моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 391–403.
7. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И.* Межгодовая изменчивость ледового покрова и первичной продукции Карского моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 578–592.
8. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И.* Сезонная изменчивость и оценка годовой величины первичной продукции фитопланктона в море Лаптевых по данным сканера MODIS-Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 48–65. https://doi.org/10.31857/S0205-96142019649-66
9. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И.* Межгодовая изменчивость первичной продукции моря Лаптевых // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С.
10. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И., Хлебопашев П.В.* Сезонная изменчивость первичной продукции Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 103–117.
11. *Добровольский А.Д., Залогин В.С.* Моря СССР. М.: Московский университет, 1982. 192 с.

12. *Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И.* Первичная продукция // Биология океана. М.: Наука, 1977. Т. 2: Биологическая продуктивность океана. С. 183–209.
13. *Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. и др.* Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-AQUA // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21–31.
14. *Мошаров С.А.,Сажин А.Ф., Дружкова Е.И., Хлебопашев П.В.* Структурные характеристики и продуктивность фитоцена юго-западной части Карского моря ранней весной // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 420–430.
15. *Салюк П.А., Степочкин И.Е., Голик И.А. и др.* Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 3. С. 45–57.
16. *Салюк П.А., Степочкин И.Е., Букин О.А. и др.* Определение концентрации хлорофилла-а спутниковыми радиометрами MODIS-Aqua и VIIRS в Восточной Арктике и Беринговом море // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 161–172.
17. *Шеберстов С.В.* Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
18. *Aagaard K., Carmack E.C.* The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № C10. P. 14485–14498. https://doi.org/10.1029/JC094iC10p14485
19. *Aitchison J., Brown J.A.C.* The lognormal distribution // Economic Journal. 1957. V. 67. P. 713–715.
20. *Anonymous.* The Venice System for the classification of marine waters according to salinity // Limnol. Oceanogr. 1958. V. 3. P. 346–347.
21. *Arrigo K.R., van Dijken G.L.* Continued increases in Arctic Ocean primary production // Progr. Oceanogr. 2015. V. 136. P. 60–70.
22. *Bhavya P.S., Lee Jang H., Lee H.W. et al.* First in situ estimations of small phytoplankton carbon and nitrogen uptake rates in the Kara, Laptev, and East Siberian seas // Biogeosciences. 2018. V. 15. № 18. P. 5503–5517.
23. *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.
24. *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.
25. *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.
26. *Bunt J.S.* Primary production: Marine ecosystems // Human Ecology. 1973. V. 1. № 4. P. 333–345.
27. *Campbell J., Antoine D., Armstrong R. et al.* Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature and irradiance // Global Biogeochem. Cycles. 2002. V. 16. № 3. https://doi.org/10.1029/2001GB001444
28. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Zwally H.J.* Arctic and Antarctic Sea Ice Concentrations from Multichannel Passive-Microwave Satellite Data Sets: October 1978-September 1995 // User's Guide. NASA TM 104647. 1997. Goddard Space Flight Center, Greenbelt. 17 p.
29. *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.
30. *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. https://doi.org/10.1029/2007JC0043257
31. *Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A. et al.* Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms // J. Sea Res. 2017. V. 125. P. 1–17.
32. *Falkowski P.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // J. Plankton Res. 1981. V.3. № 2. P. 203–216.
33. *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.
34. *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. SPIE 12. https://doi.org/10.1117/1112.981264
35. *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, https://doi.org/10.1029/2003GL016889
36. *Henson S., Moigne F., Giering S.* Drivers of carbon export efficiency in the global ocean // Global Biogeochemical Cycles. 2019. V. 33. P. 891–903. https://doi.org/10.1029/2018GB006158
37. *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.
38. *Hill V., Ardyna M., Lee S.H. Varela D.E.* // Decadal trends in phytoplankton production in the Pacific Arctic Region from 1950 to 2012 // Deep-Sea Res. II. 2018. V. 152. P. 182–194. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.12.015
39. *Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al.* Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // Estuaries and Coasts. 2012. V. 35. P. 369–382.
40. IOCCG, 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal and other opticall-complex waters. Sathyendranath, S. (Ed.). Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada. 140 p.
41. IOCCG, 2015. Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas. Babin M. et al. (Eds.) Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 16, IOCCG, Dartmouth, Canada. 130 p.
42. *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.
43. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black, and Caspian Seas // Deep-Sea Res. II. 2004. V. 51. P. 1063–1091.

44. *Kwon E.Y., Primeau F., Sarmiento J.L.* The impact of remineralization depth on the air-sea carbon balance // Nature Geoscience. 2009. V. 2. № 9. P. 630–635. https://doi.org/10.1038/ngeo612
45. *Laws E.A., Maiti K.* The relationship between primary production and export production in the ocean: Effects of time lags and temporal variability // Deep-Sea Res. I. 2019. V. 148. P. 100–107.
46. *Lee Y.J., Matrai P.A., Friedrichs M.A.M. et al.* An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-a based models // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. https://doi.org/10.1002/2015/JC11018
47. *Le Fouest V., Babin M., Trembley J.-É.* The fate of riverine nutrients on Arctic shelves // Biogeosciences. 2013. V. 10. № 6. P. 3661–3677.
48. *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. 2016. V. 130. P. 14–27.
49. *Longhurst A., Sathyendranath S., Platt T., Caverhill C.* An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data // J. Plankton Res. 1995. V.17. № 6. P.1245–1271.
50. *Matrai P.A., Olson E., Suttles S. et al.* Synthesis of primary production in the Arctic Ocean: I. Surface waters, 1954–2007 // Progr. Oceanogr. 2013. V. 110. P. 93–106.
51. *McClelland J.W., Holmes R.M., Dunton K.H., Macdonald R.W.* The Arctic Ocean estuary // Estuar. Coasts. 2012. V. 35. P. 353–368.
52. *Pabi S., van Dijken G.L., Arrigo K.R.* Primary production in the Arctic Ocean, 1998–2006 // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C08005. https://doi.org/10.1029/2007/JC004578
53. *Pavlov V.K., Timokhov L.A., Baskakov G.A. et al.* Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas // Technical Memorandum APL-UWTM1-96. Applied Physics Laboratory University of Washington. 1996. 179 p.
54. *Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G.* Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature // J. Clim. 2007. V. 20. № 22. P. 5473–5496.
55. *Sakshaug E.* Primary and secondary production in the Arctic Seas // The organic carbon cycle in the Arctic ocean. Ed.: Stein R. and Macdonald R.W. Berlin. Springer-Verlag, 2004. P. 57–81.
56. *Sarmiento J.L., Slater R., Barber R. et al.* Response of ocean ecosystems to climate warming // Global Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. GB3003, https://doi.org/10.1029/2003GB002134
57. *Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G. et al.* The large-scale freshwater cycle of the arctic // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. 1–19.
58. *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.
59. *Taucher J., Oschlies A.* Can we predict the direction of marine primary production change under global warming? // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L02603, https://doi.org/10.1029/2010GL045934
60. *Yamamoto A., Abe-Ouchi A., Yamanaka Y.* Long-term response of oceanic carbon uptake to global warming via physical and biological pumps // Biogeosciences. 2018. V. 15. P. 4163–4180. https://doi.org/10.5194/bg-15-4163-2018
61. *Yun M.S., Whitledge T.E., Kong M., Lee S.H.* // Low primary production in the Chukchi Sea shelf, 2009 // Cont. Shelf Res. 2014. V. 76. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.001

Seasonal Variability and Estimation of Annual East Siberian Sea Phytoplankton Primary Production. The Comparison with the Other Siberian Seas

A. B. Demidov[a, #], V. I. Gagarin[a], S. V. Sheberstov[a]

[a] *Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

[#] *e-mail: demspa@rambler.ru*

Studies of seasonal variability of East Siberian Sea (ESS) water column primary production (IPP) and evaluation of its total annual value (PP_{tot}) were performed using MODIS-Aqua data (2002–2018). To reach that result regional-specific primary production and chlorophyll algorithms for the first time were used. Based on multiyear averaged daily primary production Northeastern and Southwestern regions were distinguished in the ESS. Seasonal variations in IPP in the Northeastern region were characterized by the maximum in June (273 mgC m^{-2} d^{-1}). In the Southwestern region the maximum of water column primary production value was denoted in May (311 mgC m^{-2} d^{-1}). For entire ESS the maximum of IPP was registered in June (273 mgC m^{-2} d^{-1}). Values of daily primary production and PP_{tot} in the Southwestern region were, respectively, 1.8 and 2 fold higher than in the Northeastern region. Multiyear averaged value of IPP was equal to 91 mgC m^{-2} d^{-1} and PP_{tot} was equal to 9 TgC. Productivity of the Siberian seas decreased eastward.

Keywords: primary production, seasonal variability, annual primary production, remote sensing, MODIS-aqua, East Siberian Sea, Siberian seas.