

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ОЦЕНКА ГОДОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ СКАНЕРА MODIS-AQUA

© 2019 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 16.10.2019 г.

Исследования сезонной изменчивости первичной продукции в столбе воды моря Лаптевых и оценка ее годовых величин выполнены по данным сканера MODIS-Aqua, осредненным за 2002–2018 гг. Для этого впервые использованы региональные модели первичной продукции и хлорофилла. В море Лаптевых выделены два контрастных по продуктивности района: Северо-западный и Юго-восточный. Сезонные изменения первичной продукции в столбе воды в Северо-западном районе характеризовались максимумом в июне (245 мгС/м² в день). В Юго-восточном районе и для всей акватории моря Лаптевых максимальные (273–282 мгС/м² в день и 256–281 мгС/м² в день, соответственно) значения первичной продукции в столбе воды были зарегистрированы с мая по июль. Интенсивность первичного продуцирования и годовая первичная продукция в Юго-восточном районе были, соответственно, в 1.9 и 3 раза выше, чем в Северо-западном районе. Среднее для моря значение первичной продукции в столбе воды составило 125 мгС/м² в день, а ее годовая величина равнялась 8×10^{12} гС.

Ключевые слова: первичная продукция, хлорофилл, сезонная изменчивость, дистанционное зондирование, море Лаптевых

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019648-65>

ВВЕДЕНИЕ

Экосистемы арктических морей характеризуются выраженным сезонным циклом развития их компонентов, которые представляют трофические звенья разного уровня от фитопланктона до млекопитающих (Zenkevich, 1963). Сезонная динамика также присуща и функциональным характеристикам, к которым относится первичная продукция фитопланктона (ПП) — один из основных показателей трофодинамики экосистем.

Знания о сезонном цикле ПП позволяют произвести оценку ее годовой величины. Эта величина служит основой для расчетов потока вещества и энергии в пищевых цепях (Виноградов, 2008; Kearney et al., 2013; May, McLean, 2007; Pauly, Christensen, 1995; Ryther, 1969), количества органики, которая опускается из верхних слоев океана и захоранивается на дне (Биогеохимия океана, 1983; Лисицин, 2014; Henson et al., 2012; Siegel et al., 2014), а также обмена углекислого газа между атмосферой и океаном (Fay, McKinley, 2013; Volk, Hoffert, 1985). Долговременные изменения годовых величин первичной продукции являются одним из показателей изменчивости климата на планете (Behrenfeld et al., 2006; Vopp et al., 2001; Chavez et al., 2011; Gregg et al., 2003; Sarmiento et al.,

2004; Taucher, Oschlies, 2011). Их изучение особенно актуально в свете происходящего в последние десятилетия быстрого потепления Арктического океана, связанного с повышением температуры воды (Polyakov et al., 2012; Slagstad et al., 2011), что приводит к сокращению площади и толщины ледового покрова (Алексеев и др., 2015; Иванов и др., 2013; Мордвинцев и др., 2010; Шалина, 2015; Arrigo, van Dijken, 2015; Cavalieri, Parkinson, 2012; Comiso, 2012; Stroeve et al., 2012).

Экспедиционных данных о сезонных изменениях ПП в арктических морях крайне мало из-за невозможности охватить полевыми наблюдениями весь вегетационный сезон в этих труднодоступных районах Мирового океана. Так, в море Лаптевых исследования проводились лишь в августе и сентябре (Демидов и др., 2019; Gleitz, Grossmann, 1997, Sorokin, Sorokin, 1993, Tuschling, 2000). Другие немногочисленные данные измерений ПП в приповерхностном слое моря Лаптевых хранятся в базе данных ARCSSL-PP (https://www.nodc.noaa.gov/archive/arc0028/0063065/1.1/data/0-data/ARCSSL-PP_FGDCmetadata.htm). Косвенно о величинах ПП можно судить по данным о содержании хлорофилла (здесь и далее под термином “хлорофилл” подразумевается хлорофилл “а” — Хл), которые также немногочисленны

(Ветров и др., 2008, Gleitz, Grossmann, 1997, Heiskanen, Keck, 1996, Juterzenka, Knickmeier, 1999, Tuschling, 2000). Таким образом, прямые измерения продукционных параметров фитопланктона отсутствуют для большей части вегетационного сезона, который в море Лаптевых продолжается с апреля по октябрь (214 дней).

В связи с этим спутниковые данные сканеров цвета океана, которые позволяют рассчитать значения основных абиотических и биотических параметров, определяющих ПП, являются в настоящее время основным источником информации для восстановления ее сезонного цикла и проведения оценок годовой величины. Эти данные, к которым относятся, в частности, содержание Хл на поверхности (X_{l_0}) и фотосинтетически активная радиация (ФАР) служат входящими параметрами в продукционные модели, расчет по которым позволяет получить значения ПП (Arrigo, van Dijken, 2011, 2015, Bélanger et al., 2013, Hill et al., 2013, Pabi et al., 2008).

На функционирование экосистем морей Сибирской Арктики оказывают влияние их положение в высоких широтах, речной сток и мелководный характер водоемов. Эти моря относятся к водоемам второго оптического типа (Case II), оптические свойства которых во многом формируются аллохтонным растворенным и взвешенным органическим веществом (ЮСССГ, 2000). Оценка ПП таких акваторий должна проводиться с применением регионального подхода, который заключается, прежде всего, в использовании регионально адаптированных моделей (Demidov et al., 2017; ЮСССГ, 2015; Lee et al., 2015). Это положение в полной мере относится к морю Лаптевых. Короткий вегетационный сезон, продолжительность которого ограничивают полярная ночь и ледовый покров, способствуют ограничению потока ФАР в верхний продуцирующий слой моря. Площадь континентального шельфа моря Лаптевых равна 460 000 км² (Holmes, Creager, 1974), что составляет ~ 7% площади шельфа всего Арктического океана. Влияние пресных материковых вод определяется, в первую очередь, стоком реки Лена (524–588 км³ в год), второго по объему, поступающего в Арктический океан (Dittmar, Kattner, 2003, Holmes et al., 2012, McClelland et al., 2016).

Ранее оценка годовой величины ПП моря Лаптевых осуществлялась с использованием “универсальных” для арктического региона продукционных алгоритмов, осреднение было проведено в разные временные интервалы и в различных географических границах моря. Таким образом, представляется полезным проведение оценок ПП этого региона с использованием новых подходов.

В предыдущих работах приводятся результаты разработки и верификации региональных моделей первичной продукции и хлорофилла Карского моря (Кузнецова и др., 2013; Demidov et al., 2017). Показано также, что разработанный алгоритм ПП дает удовлетворительные результаты в море Лаптевых (Демидов и др., 2016), большая часть акватории которого, как и Карское море, относится к водоемам Case II типа (ЮСССГ, 2000). А priori можно предположить, что разные районы моря Лаптевых могут отличаться как по величине годовой ПП, так и по характеру ее сезонного цикла. Поэтому, представляется важным проведение продукционного районирования моря.

Таким образом, целями настоящей работы являлись: (1) — описание сезонной изменчивости ПП и Хл в различных по продуктивности районах моря Лаптевых; (2) — оценка годовой первичной продукции фитопланктона моря Лаптевых. Для достижения этих целей мы впервые предлагаем региональный подход. Он заключается в использовании регионально адаптированных моделей ПП фитопланктона (Demidov et al., 2017) и хлорофилла (Кузнецова и др., 2013).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспедиционные данные. Разработка и верификация региональных моделей ПП и Хл была выполнена на основе базы натуральных наблюдений, проведенных в конце августа–начале октября (Ведерников и др., 1994; Демидов и др., 2016; Кузнецова и др., 2013; Мошаров, 2010; Demidov et al., 2014). Так как этот массив данных был собран в Карском море, нами было проведено тестирование разработанной продукционной модели по результатам измерений, полученным в море Лаптевых (Демидов и др., 2019). Такая работа была сделана с целью проверки эффективности модели ПП на акватории, сходной с Карским морем по гидрологическим и гидрохимическим показателям, которой было показано, что разработанная нами модель работает приблизительно с одинаковой эффективностью, как в Карском море, так и в море Лаптевых (Демидов и др., 2016).

Спутниковые данные. Данные сканера цвета Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS-Aqua) L2 уровня за период с 2002 по 2018 гг., получены с сайта National Aeronautics and Space Administration (NASA) www.oceancolor.gsfc.nasa.gov в границах моря Лаптевых, которые были приняты в одной из предыдущих работ по оценке первичной продукции Арктического океана (Hill et al., 2013). Эти данные были обработаны с помощью программного обеспечения

SMCS, разработанного в ИО РАН (Шеберстов, 2015). Аналогичный подход к обработке космических снимков широко используется в выявлении мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана и мониторинге его загрязнений (Бондур и др., 2005, 2006, 2017). Значения коэффициента спектральной яркости моря $R_{rs}(\lambda_j)$ были пересчитаны в величины концентрации X_{L_0} по региональному алгоритму (см. ниже).

Данные по фотосинтетически активной радиации использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua (Frouin et al., 2012). Как было отмечено в этой работе, модельные величины ФАР превышали измеренные. Анализ данных по ФАР Карского моря также показал систематическое завышение спутниковых значений ФАР. 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.

Температурные файлы OI SST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 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 (Reynolds et al., 2007).

Площадь акватории покрытой льдом рассчитывалась с помощью программного обеспечения SMCS (Шеберстов, 2015) по первичным данным, полученным с сайта ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202_v2/north/daily (Comiso, Nishio, 2008). При расчете первичной продукции фитопланктона свободной ото льда считалась акватория, если площадь ледового покрытия была $< 15\%$ (Cavalieri et al., 1997).

Большая часть акватории моря Лаптевых 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.

Расчет среднемесячных и среднегодовых значений. Данные L2 уровня осреднялись для ячеек 9×9 км программой SMCS (Шеберстов, 2015) согласно алгоритму, описанному ранее (Korelevich et al., 2004). Среднемесячные значения исследуемых параметров были получены путем осреднения последовательно для каждого месяца отдельного года в период с 2002 по 2018 гг. Затем проводился расчет среднееголетних величин для каждого месяца с апреля по октябрь. Далее был проведен расчет среднееголетних величин, которые были получены осреднением всего массива данных 2002–2018 гг. за вегетационный сезон (214 дней). Среднееголетнее значение первичной продукции для площадей выделенных районов (см. ниже) и для всей акватории моря Лаптевых (PP_{tot}) рассчитывалось умножением среднееголетней величины на площадь исследуемой акватории.

Региональные модели первичной продукции и хлорофилла. Формула расчета первичной продукции в столбе воды (IPP) имеет вид

$$IPP = \psi \times k \times Chl_0 \times I_0,$$

где ψ — средняя для всей акватории величина эффективности утилизации солнечной энергии (Falkowski, 1981), k — средний для всего моря индекс вертикального распределения X_L , Chl_0 — концентрация хлорофилла на поверхности, I_0 — величина дневной подповерхностной ФАР (E_{in}/m^2).

$$\psi = DAN_{av}/I_0,$$

где DAN_{av} — среднее в слое фотосинтеза дневное ассимиляционное число ($mgC/mg\ xl\ "a"$).

$$k = Chl_{ph} / Chl_0,$$

где Chl_{ph} — интегральное значение хлорофилла в слое фотосинтеза.

Распределение произведения $\psi \times k$ имеет логнормальный вид (Demidov et al., 2017), поэтому целесообразно использовать его среднюю геометрическую величину (Aitchison, Brown, 1957). Для всей акватории моря Лаптевых она равняется 7.95. Таким образом, итоговое уравнение модели имеет вид

$$IPP = 7.95 \times Chl_0 \times I_0.$$

Известно, что стандартный алгоритм MODIS завышает величины концентрации X_{L_0} в водах второго оптического типа (например, IOCCG, 2000). Для того, чтобы избежать больших ошибок в определении ИПП, мы использовали региональный алгоритм расчета X_{L_0} (Кузнецова и др., 2013), где наилучшая корреляция измеренных и расчетных величин x_L “a” ($R^2 = 0.47$; $N = 185$) была получена при использовании отношения $R_{rs}(531) / R_{rs}(547)$:

$$\ln(Chl_0) = -3.66 \ln(R_{rs}(531) / R_{rs}(547)) + 0.116.$$

Региональные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла в российских морях в последнее время широко используются для восстановления этого показателя по спутниковым данным (Салюк и др., 2013, 2016; Korelevich et al., 2004).

Районирование моря Лаптевых. 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). Нами были выделены Северо-западный и Юго-восточный районы. Границей между этими районами был принят северный предел распространения речных вод и вод полыньи моря Лаптевых (Vauch, Cherniavskaia, 2018). Эта граница близка к летнему положению изогаляны 25 psu (Добровольский, Залогин, 1982; Vauch et al., 2010; Golubeva et al., 2015), которую принято

считать разделом между распресненными и морскими водами (The Venice System..., 1958). При сравнении положения этой границы с распределением среднееголетних величин первичной продукции (рис. 1) выяснилось, что она практически совпадает с изолинией 100 мгС/м² в день. Эта величина разделяет олиготрофные (< 100 мгС/м² в день) и мезотрофные (100–500 мгС/м² в день) воды (Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Среднееголетние величины первичной продукции. Осреднение массива спутниковых данных за 2002–2018 гг. позволило получить картину пространственного распределения первичной продукции в море Лаптевых (рис. 1). Среднееголетние величины ИПП уменьшались в направлении

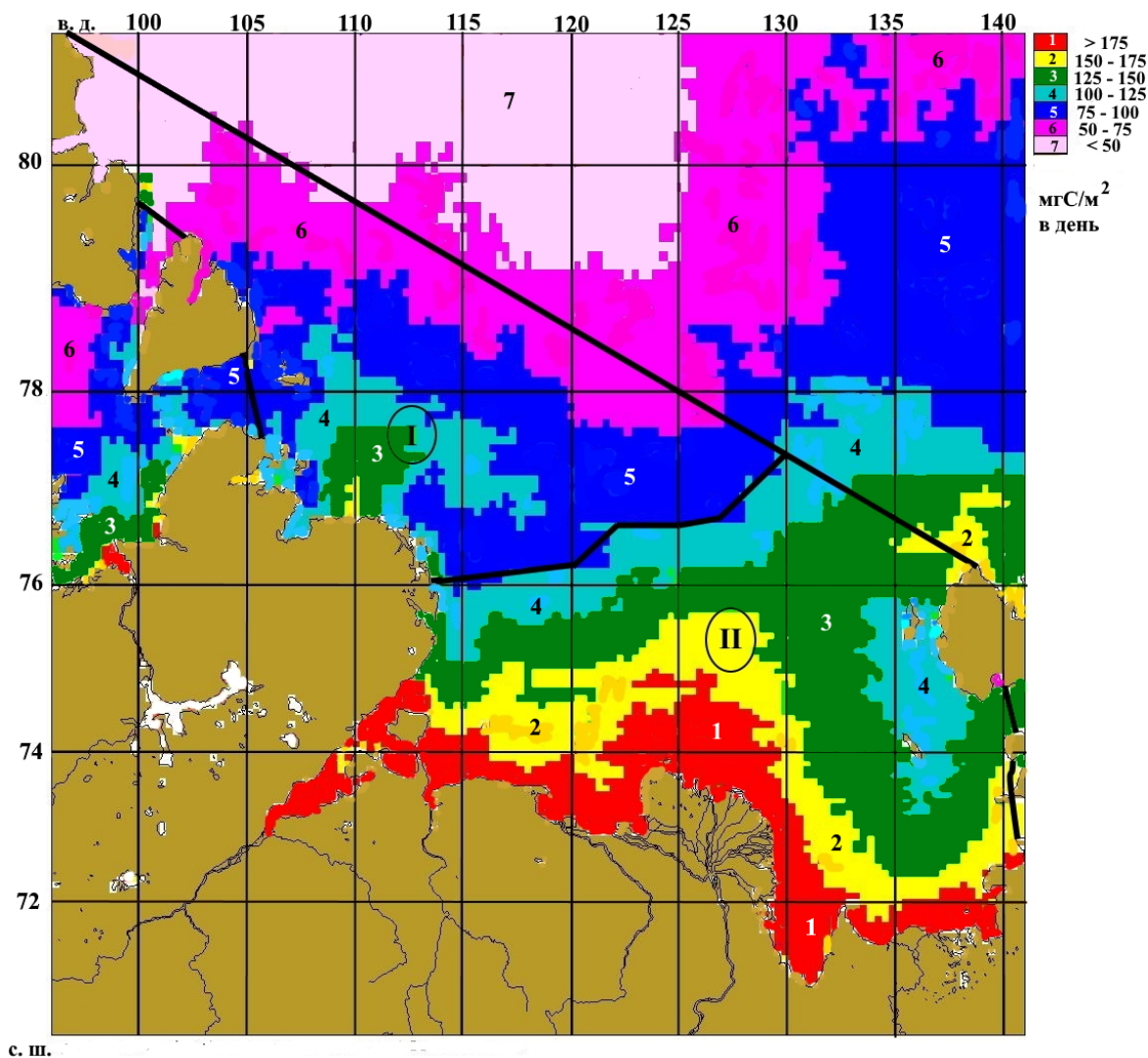


Рис. 1. Первичная продукция в море Лаптевых, осредненная по данным сканера MODIS-Aqua за 2002–2018 гг. I — Северо-западный район; II — Юго-восточный район. Границы моря приведены, согласно (Hill et al., 2013).

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

Район	Площади районов (S)			ПП районов			
	км ²	% от ΣS	средний за вегетационный сезон % S свободной ото льда	мгС/м ² в день	гС/м ² в год	10 ¹² гС в год (ПП _{tot})	% от ПП _{tot}
Северо-западный	208459	36	64±10	80±25	17	2	19
Юго-восточный	362823	64	48±8	152±31	33	6	81
Все море	S	571282	100	54±12			
	ПП			125±46	27	8	100

Примечание. Представлены средние арифметические величины и стандартное отклонение.

с юга-востока на северо-запад. При этом максимальные значения (> 175 мгС/м² в день) были отмечены у побережий в местах впадения рек, а минимальные (< 50 мгС/м² в день) у северо-восточного побережья архипелага Северная Земля. На большей части акватории моря среднемноголетние значения ИПП оказались в диапазоне 50–175 мгС/м² в день. Осредненные за 17 лет величины первичной продукции в Юго-восточном районе оказались в 1.9 раза выше, чем в Северо-западном (табл. 1). Средние величины ПП достоверно отличались по *t*-критерию Стьюдента ($p < 0.05$).

Сезонные изменения первичной продукции и хлорофилла. В Северо-западном районе величина ИПП возрастала с мая по июнь (рис. 2а), когда был отмечен ее максимум (245 мгС/м² в день) (табл. 2). Начиная с июня происходило уменьшение среднемноголетнего значения ИПП до минимального (22 мгС/м² в день), отмеченного в октябре. Таким образом, в течение года ИПП изменялась более чем на порядок (11.1 раза). В отличие от ИПП, концентрация хлорофилла увеличивалась с апреля по октябрь в 1.8 раза.

В Юго-восточном районе моря Лаптевых общий вид кривых сезонных изменений ИПП и Хл₀ был схожим с Северо-западным районом (рис. 2б). Из отличий стоит выделить более продолжительный период повышенных величин ИПП в этом районе. Так, в мае–июле первичная продукция в столбе воды варьировала незначительно и составляла от 273 до 282 мгС/м² в день с максимумом в мае (табл. 2). С июля по октябрь происходило снижение величин этого показателя до 32 мгС/м² в день. Изменчивость ИПП в течение года в Юго-восточном районе была меньше, чем в Северо-западном районе (8.8 раза). Также меньше варьировало содержание Хл на поверхности. При схожей тенденции к увеличению Хл₀ к октябрю, изменчивость этого параметра составила 1.5 раза.

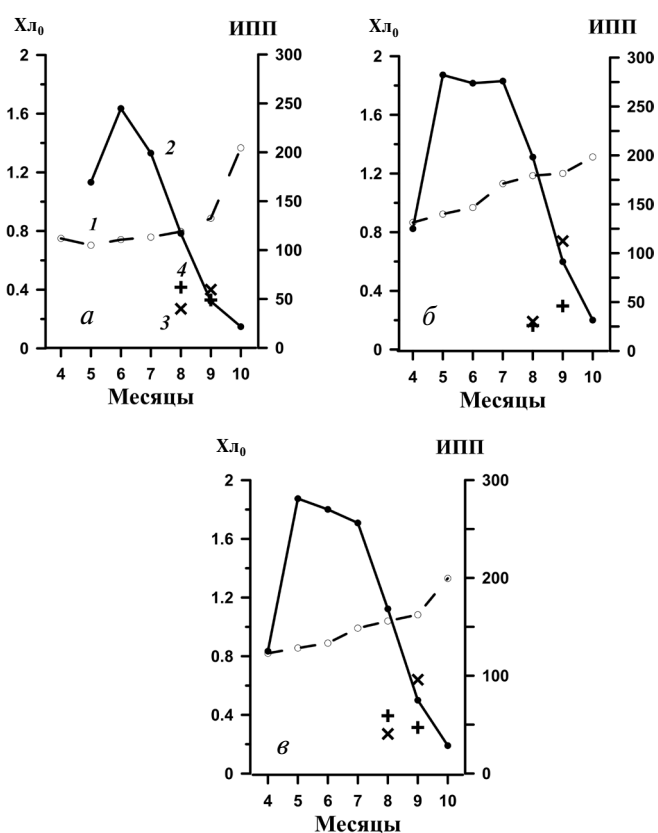


Рис. 2. Сезонные изменения содержания поверхностного хлорофилла (Хл₀, мг/м³) — 1 и интегральной первичной продукции (ИПП, мгС/м² в день) — 2 в различных районах моря Лаптевых по данным сканера MODIS-Aqua, осредненные за 2002–2018 гг. Для сравнения представлены средние данные полевых наблюдений Хл₀ — 3 (косой крестик) и ИПП — 4 (прямой крестик) за 2015, 2017 и 2018 гг. а — Северо-западный район; б — Юго-восточный район; в — все море.

В масштабе всего моря (рис. 2в) максимальное значение ИПП зарегистрировано в мае (281 мгС/м² в день). В июне и июле происходит незначительное уменьшение ИПП до 256 мгС/м² в день. Резкое уменьшение интегральной первичной продукции

Таблица 2. Статистические показатели, характеризующие сезонные изменения первичной продукции в столбе воды и хлорофилла на поверхности в различных районах моря Лаптевых

Месяц	Район					
	Северо-западный		Юго-восточный		все море	
	ИПП	Хл ₀	ИПП	Хл ₀	ИПП	Хл ₀
Апрель	нет данных	$\frac{0.75 \pm 0.21}{1037}$	$\frac{125 \pm 11}{3}$	$\frac{0.87 \pm 0.13}{1207}$	$\frac{125 \pm 11}{3}$	$\frac{0.82 \pm 0.18}{2244}$
Май	$\frac{169 \pm 11}{5}$	$\frac{0.70 \pm 0.13}{1255}$	$\frac{282 \pm 45}{376}$	$\frac{0.92 \pm 0.17}{2239}$	$\frac{281 \pm 46}{381}$	$\frac{0.86 \pm 0.19}{3494}$
Июнь	$\frac{245 \pm 43}{312}$	$\frac{0.74 \pm 0.08}{2584}$	$\frac{273 \pm 43}{1822}$	$\frac{0.97 \pm 0.25}{3741}$	$\frac{270 \pm 44}{2134}$	$\frac{0.89 \pm 0.24}{6325}$
Июль	$\frac{199 \pm 35}{1621}$	$\frac{0.76 \pm 0.09}{3010}$	$\frac{276 \pm 58}{3787}$	$\frac{1.13 \pm 0.25}{3812}$	$\frac{256 \pm 63}{5408}$	$\frac{0.99 \pm 0.27}{6822}$
Август	$\frac{117 \pm 23}{2913}$	$\frac{0.80 \pm 0.09}{3012}$	$\frac{198 \pm 40}{3807}$	$\frac{1.19 \pm 0.22}{3809}$	$\frac{168 \pm 52}{6720}$	$\frac{1.04 \pm 0.26}{6821}$
Сентябрь	$\frac{48 \pm 9}{3010}$	$\frac{0.89 \pm 0.13}{3012}$	$\frac{91 \pm 24}{3816}$	$\frac{1.20 \pm 0.21}{3817}$	$\frac{75 \pm 29}{6826}$	$\frac{1.08 \pm 0.24}{6829}$
Октябрь	$\frac{22 \pm 8}{2119}$	$\frac{1.37 \pm 0.75}{2119}$	$\frac{32 \pm 10}{3796}$	$\frac{1.31 \pm 0.25}{3816}$	$\frac{29 \pm 10}{5915}$	$\frac{1.33 \pm 0.48}{6314}$

Примечание. ИПП — первичная продукция в столбе воды (мгС/м² в день); Хл₀ — концентрация хлорофилла “а” на поверхности (мг/м³). В числителе приведены средняя арифметическая величина и стандартное отклонение, в знаменателе — количество пикселей, по которым проводилось осреднение.

(в 8.8 раза) наблюдается с августа по октябрь. Значения Хл₀ постепенно увеличивались с апреля по октябрь. Для всего моря Лаптевых концентрация хлорофилла на поверхности за этот период времени возросла в 1.6 раза.

Сезонный ход рассчитанной на площадь районов и всего моря первичной продукции (ПП_{тот}) (рис. 3) был похож на сезонные изменения ИПП. Максимум ПП_{тот} был сдвинут на 1–2 месяца относительно кривой ИПП из-за большей площади моря, свободной ото льда, в июле–августе.

Сезонные изменения ФАР, температуры воды и площади ледового покрытия. Во всех районах и для моря Лаптевых в целом зарегистрирован идентичный сезонный ход ФАР (рис. 4). Ее значения возрастали с начала вегетационного сезона, достигали максимума в июне и снижались к октябрю. Средние величины ФАР, поверхностной температуры и площади ледового покрытия приведены в табл. 3. При похожем с ФАР ходе сезонных изменений температуры воды на поверхности (Т₀) максимум ее значений был смещен на август. Площадь ледового покрытия закономерно уменьшалась с апреля по сентябрь и начинала возрастать с началом ледостава в октябре.

Годовые величины первичной продукции моря Лаптевых. Основываясь на сезонном ходе ИПП и значениях этого параметра в разные месяцы

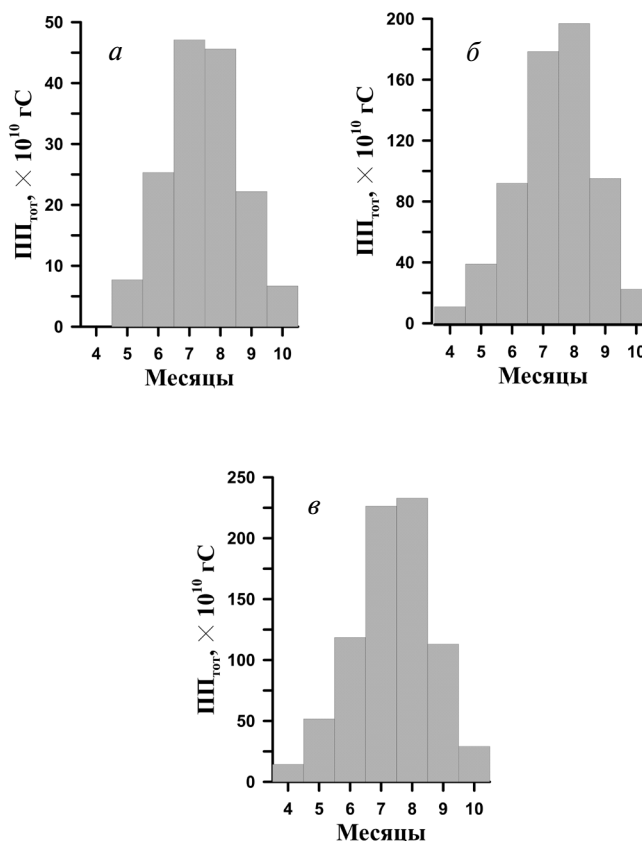


Рис. 3. Сезонные изменения первичной продукции фитопланктона (ПП_{тот}) в различных районах моря Лаптевых. а — Северо-западный район; б — Юго-восточный район; в — все море.

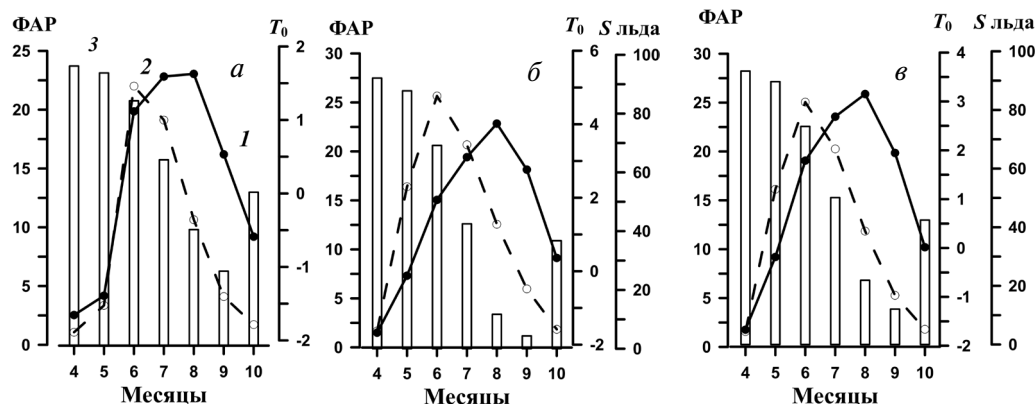


Рис. 4. Сезонные изменения температуры воды на поверхности (T_0 , °C) — 1, фотосинтетически активной радиации (ФАР, Ein/m^2 в день) — 2 и площади моря, покрытой льдом (S , % от площади акватории района) — 3 в различных районах моря Лаптевых по спутниковым данным (см. раздел “Материал и методы”). а — Северо-западный район; б — Юго-восточный район; в — все море.

Таблица 3. Статистические показатели, характеризующие сезонные изменения фотосинтетически активной радиации, температуры на поверхности и площади ледового покрова в различных районах моря Лаптевых

Месяц	Район								
	Северо-западный			Юго-восточный			все море		
	ФАР	T_0	S льда	ФАР	T_0	S льда	ФАР	T_0	S льда
Апрель	1.1 ± 0.2 20	-1.65 ± 0.08 63	95 ± 7 3106	1.7 ± 0.7 80	-1.67 ± 0.10 200	92 ± 12 4079	1.6 ± 0.7 100	-1.67 ± 0.10 263	93 ± 10 7185
Май	3.4 ± 1.6 19	-1.39 ± 0.28 61	93 ± 6 3106	16.4 ± 5.8 728	-0.12 ± 0.85 940	88 ± 13 4079	16.1 ± 6.0 747	-0.18 ± 0.88 1001	90 ± 11 7185
Июнь	22.0 ± 5.5 439	1.12 ± 1.00 586	83 ± 11 3106	25.7 ± 3.6 1888	1.94 ± 1.21 2149	69 ± 16 4079	25.1 ± 4.2 2327	1.79 ± 1.22 2735	74 ± 16 7185
Июль	19.1 ± 2.1 1728	1.59 ± 0.90 1916	63 ± 14 3106	20.7 ± 1.8 3798	3.11 ± 0.99 4027	42 ± 13 4079	20.3 ± 2.0 5526	2.69 ± 1.18 5943	50 ± 17 7185
Август	10.6 ± 1.3 3011	1.63 ± 0.74 3027	40 ± 16 3106	12.6 ± 0.7 3814	4.02 ± 0.92 4041	12 ± 8 4079	11.9 ± 1.3 6825	3.15 ± 1.43 7068	22 ± 18 7185
Сентябрь	4.1 ± 0.6 3014	0.53 ± 0.52 3101	26 ± 14 3106	6.0 ± 0.8 3817	2.77 ± 0.80 4041	4 ± 7 4079	5.3 ± 1.2 6831	1.95 ± 1.29 7142	12 ± 14 7185
Октябрь	1.7 ± 0.9 2975	-0.59 ± 0.37 3074	52 ± 11 3106	1.8 ± 0.6 3821	0.36 ± 0.52 4038	37 ± 8 4079	1.8 ± 0.8 6796	0.02 ± 0.65 7112	42 ± 12 7185

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

вегетационного сезона можно рассчитать годовые величины (ПП_{tot}) в различных районах и для моря в целом. ПП_{tot} Юго-восточного района оказалась в 3 раза выше, чем в Северо-западного района, соответственно, 6 и 2×10^{12} гС в год. Возрастание разницы в продуктивности этих районов по этому показателю по сравнению с ИПП объясняется большей в 1.7 раза площадью Юго-восточного района (табл. 1). Годовая величина первичной

продукции моря Лаптевых оказалась равной 8×10^{12} гС в год. При этом доля Северо-западного района в общей ПП моря составляет 19%, а доля Юго-восточного района — 81%.

В табл. 4 показан вклад различных месяцев в годовую величину ПП моря Лаптевых. Закономерно, что максимальный вклад по районам и всему морю приходится на долю июля и августа (от 28% до 31%). Минимальный вклад в годовую

Таблица 4. Доля (%) ПП фитопланктона в различные месяцы вегетационного сезона в суммарной годовой первичной продукции

Район	Месяц						
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Северо-западный	нет данных	5	16	31	30	14	4
Юго-восточный	2	6	14	28	31	15	4
Все море	2	7	15	29	29	14	4

ПП_{тот} вносят апрель, май и октябрь, месяцы начала и конца вегетационного периода, из-за низких значений скорости фотосинтеза и небольшой площади моря, свободной ото льда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сезонные изменения продукционных параметров и факторов среды. Результаты, описывающие сезонные изменения ИПП в море Лаптевых, приведенные в настоящей работе, в целом схожи с результатами для других морей Арктического океана (Демидов и др., 2017; Carmack et al., 2004; Juul-Pedersen et al., 2015; Rysgaard et al., 1999; Sakshaug, Slagstad, 1991; Sørensen et al., 2015). Основными абиотическими факторами, определяющими сезонную динамику продукционных показателей, являются время освобождения акватории ото льда, изменения в течение года уровня ФАР, концентрации биогенных элементов и стратификация водного столба (Sakshaug, 2004). В Арктических морях, где речной сток оказывает большое влияние на поступление биогенных элементов в эвфотический слой, к этим факторам добавляется время начала и интенсивность паводка (Holmes et al., 2012; Le Fouest et al., 2013).

Известно, что сезонная динамика ИПП Арктических морей определяется годовым ходом ФАР (Sakshaug, 2004), в то время как уровень снабжения биогенными элементами поддерживает процесс продуцирования, но не инициирует его (Harrison, Cota, 1991). Результаты сравнения рис. 2 и 4 показывают, что максимальные величины ИПП в течение года достигаются в месяцы с максимальным уровнем ФАР. Следует отметить, что такой эффект совпадения отчасти достигается тем, что ФАР напрямую входит в модельную формулу расчета ИПП.

Другим фактором, который определяет уровень ИПП моря Лаптевых является концентрация Хл₀. На рис. 2 видно, что сезонный ход кривых ИПП и Хл₀ отличается очень сильно, а максимальные значения этих показателей не совпадают во времени. Следует отметить также, что концентрация Хл₀ является менее вариабельным показателем, чем ИПП. Причины, вызывающие подобную

картину обсуждались ранее при исследовании сезонных изменений первичной продукции Карского моря (Демидов и др., 2017). Здесь мы кратко перечислим, что этими причинами могут быть высокая роль фотофизиологических параметров и ФАР и незначительная роль биомассы фитопланктона в формировании ИПП, ошибки модельных расчетов этого параметра при завышении концентрации Хл₀ региональным алгоритмом, эффект пространственно-временного осреднения. Тенденция к увеличению концентрации Хл₀ к концу вегетационного сезона (рис. 2) может объясняться накоплением биомассы фитопланктона в течение года при уменьшении скорости выедания.

Среднемесячные величины ИПП (табл. 2) характеризуют все исследованные районы моря Лаптевых как мезотрофные (100–500 мгС/м² в день) с апреля по август и олиготрофные (< 100 мгС/м² в день) в конце (сентябрь, октябрь) вегетационного сезона (Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977). Средние величины для всей акватории моря подтверждают этот вывод. Следует отметить, что максимальные величины ИПП в мае–июне невелики, от 245 мгС/м² в день в Северо-западном районе до 281 мгС/м² в день для всего моря (табл. 2). Причины невысоких значений ИПП в море Лаптевых 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). Поступление биогенных элементов с речным стоком, по-видимому, не может компенсировать незначительный их 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 (McClelland et al., 2012).

В настоящей работе в море Лаптевых нами выделены два контрастных по продуктивности района: Северо-западный олиготрофный и Юго-восточный мезотрофный. Уровень первичной

продукции в этих районах достоверно различался почти в два раза. Основной причиной различий их ИПП мы видим в том, что основные абиотические факторы в первом из них не столь “агрессивны” по отношению к процессу первичного продуцирования. Так, средний уровень ФАР и температуры в Юго-восточном районе выше практически во все месяцы года (табл. 3). Другой причиной может быть влияние речного стока в основном Лены и Хатанги. Юго-восточный район расположен в зоне воздействия этого стока, максимум которого приходится на июнь (Le Fouest et al., 2013), и получает с ним больше биогенных элементов, чем Северо-западный район. Ранее обсуждалась роль речного выноса в снабжении биогенами поверхностных вод Карского моря с точки зрения обеспечения процесса первичного продуцирования (Демидов и др., 2017). Отмечалось, что влияние рек на продуктивность Арктических морей противоречиво. С одной стороны — усиление стратификации, повышение мутности и ослабление

потока ФАР (Demidov et al., 2014). С другой стороны — снабжение биогенами и органическим веществом, которое с разными скоростями, но все же реминерализуется (Cooper et al., 2005; Hansell et al., 2004; Holmes et al., 2008; Opsahl et al., 1999; Osburn et al., 2009), и частичная компенсация незначительного потока снизу.

Оценки годовых величин первичной продукции моря Лаптевых. Оценки годовой величины первичной продукции моря Лаптевых неоднократно проводились ранее (Виноградов и др., 2000; Ветров, Романкевич, 2014; Данюшевская и др., 1990; Arrigo, van Dijken, 2015; Bélanger et al., 2013; Hill et al., 2013; Lewis et al., 2016; Pabi et al., 2008; Sakshaug, 2004). Величины годовой ПП_{тот}, приведенные в этих работах, были получены для моря в пределах его географических границ, либо для сектора моря Лаптевых, куда попадали акватории Восточно-Сибирского моря и центрального Арктического бассейна (табл. 5). При оценках, которые проводили некоторые авторы, северная

Таблица 5. Оценки годовой величины первичной продукции моря Лаптевых

Источник	Период осреднения (годы)	Вегетационный сезон (месяцы)	Границы моря	Годовая первичная продукция, 10 ¹² гС
Данюшевская и др. (1990)	Использованы полевые данные до конца 80-х гг. XX в	Экстраполяция результатов, полученных в летне-осенний период на весь вегетационный сезон	Географические	10.2
Виноградов и др. (2000)	1978–1986	май–сентябрь	Географические	10–15
Ветров, Романкевич (2014)	2003–2012	апрель–октябрь	Географические	11–17
Arrigo, van Dijken (2015)	1998–2012	май–сентябрь	Секторальные	51.5
Sakshaug (2004)	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) 16
Pabi et al. (2008)	1998–2006	апрель–октябрь	Секторальные	26*
Lewis et al. (2016)	2003–2013	не известен	Географические	42**
Bélanger et al., (2013)	1998–2010	май–сентябрь	Географические	31***
Наши данные	2002–2018	апрель–октябрь	Географические	8

* Нами произведен расчет средней величины за 1998–2006 гг. по данным авторов.

**Нами рассчитана средняя величина за 2003–2013 гг. по данным авторов.

***Расчет годовой величины первичной продукции произведен нами по средним дневным величинам за период с мая по сентябрь, приведенным авторами.

и южная части моря Лаптевых рассматриваются вместе с Восточно-Сибирским морем (Hill et al., 2013). 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 PP_{tot} . Как показано в табл. 4, вклад апреля и октября в годовую первичную продукцию составляет в сумме всего 6%.

При сравнении с литературными данными выявляются различия в картине сезонной изменчивости ИПП. Так, в работе (Bélanger et al., 2013) максимум этого показателя приходится на июль–август, в то время, как у нас это май–июнь. По сравнению с результатами, приведенными в этой работе, в мае и июне рассчитанные нами значения ИПП выше в 1.2–2.3 раза, в то время как в июле–сентябре они ниже в 2–5.5 раза. С другой стороны, годовая величина ПП фитопланктона, рассчитанная на единицу площади моря (27 гС/м^2), приводимая в настоящей работе (табл. 1) укладывается в диапазон изменчивости этого показателя ($25–40 \text{ гС/м}^2$), который приводится в работе (Sakshaug, 2004).

Превышение результатов разных авторов по сравнению с нашими данными при оценке PP_{tot} от 3 до 6.5 раз (табл. 5) можно объяснить как учетом ПП на заведомо большей по площади, чем море Лаптевых, акватории, так и использованием разных моделей. Ниже мы приведем краткий анализ причин расхождений наших оценок только с результатами авторов, использовавших спутниковые данные и модельные расчеты. Поэтому мы не сравниваем данные, приведенные в настоящей статье, с работами (Данюшевская и др., 1990; Sakshaug, 2004). Один из источников расхождений — использование разными авторами различных алгоритмов спутникового хлорофилла. Как уже было сказано, районы речного выноса в море Лаптевых относятся к акваториям Case II, для которых нужно использовать региональный хлорофильный алгоритм. В настоящее время такого алгоритма для моря Лаптевых не существует. Поэтому, для расчета концентрации Xl_0 в этом регионе используются модели для вод второго оптического типа Арктического океана. Сравнение результатов, полученных с помощью различных алгоритмов Xl_0 представлены в работе (Lewis et al., 2016). Нами был использован несколько иной подход, опирающийся на использование модели Xl_0 для Карского моря (Кузнецова и др., 2013), близкой акватории к морю Лаптевых по гидрофизическим и гидрохимическим свойствам.

Продукционные алгоритмы можно разделить на две группы: с использованием только концентрации Xl_0 (Виноградов и др., 2000; Ветров, Романкевич, 2014) и модели, включающие фотоадаптивные параметры и ФАР (Arrigo, van Dijken, 2015; Bélanger et al., 2013; Lewis et al., 2016; Pabi et al., 2008). Применение первого подхода чревато значительными ошибками, так как ПП в столбе воды в Арктическом океане слабо зависит от концентрации Xl_0 (Demidov et al., 2014; Platt, Sathyendranath, 1995). Более сложные продукционные модели в качестве коэффициентов включают осредненные значения очень вариабельных фотоадаптивных параметров (ассимиляционное число, отношение углерода фитопланктона к концентрации Xl , эффективность фотосинтеза). Их использование может давать хороший результат в районах Мирового океана, где они и были рассчитаны. При переносе этих значений на другие акватории ошибки расчета ПП возрастают.

Один из способов улучшения моделей ПП заключается в определении регионально адаптированных значений этих показателей. В настоящей работе нами использовались значения параметра эффективности фотосинтеза, рассчитанного на базе измерений продукционных показателей в море Лаптевых. Данные полевых наблюдений говорят о низком уровне ПП в этом регионе (Демидов и др., 2019). Очевидно, с этим связана полученная нами самая низкая оценка PP_{tot} моря Лаптевых по сравнению с предыдущими исследованиями (табл. 5). Кроме этого, мы считаем нашу оценку завышенной. К такому выводу можно придти, после проведения сравнения осредненных данных натурных измерений и спутниковых наблюдений (рис. 2). Так, в августе в для различных районов и моря Лаптевых в целом превышение ИПП, рассчитанной по модельным и спутниковым данным, над измеренными значениями составило 1.9–7.6 раза, а превышение спутникового Xl над результатами, полученными в экспедициях, 3.3–6.3 раза. В сентябре аналогичное превышение составило, соответственно, 1.6–2 и 1.8–3.4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сезонный цикл первичной продукции в морях Сибирской Арктики изучен далеко не полностью. Так, практически отсутствуют полевые данные для начала вегетационного сезона (апрель–июнь). Недостаточно экспериментальных исследований проведено и в другие месяцы года. Нуждаются также в совершенствовании оценки первичной продукции. Пути улучшения таких оценок авторы видят в получении новых натурных данных

по параметрам первичной продуктивности региона, в разработке и верификации новых, более совершенных моделей первичной продукции и хлорофилла. С этой точки зрения, нам видится перспективным применение регионального подхода, который учитывает специфику взаимосвязей продукционных параметров фитоплankтона 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.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.

Биогеохимия океана. Ред.: Монин А.С., Лисицин А.П. М.: Наука, 1983. 368 с.

Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22. doi: 10.7868/S020596141706001X.

Бондур В.Г., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исследование Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.

Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных

спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.

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.

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.

Ветров А.А., Романкевич Е.А., Беляев Н.А. Хлорофилл, первичная продукция, потоки и баланс органического углерода в море Лаптевых // Геохимия. 2008. № 10. С. 1122–1130.

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.

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.

Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С. Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.

Демидов А.Б., Гагарин В.И., Арашкевич Е.Г., Маккавеев П.Н., Конюхов И.В., Воробьева О.В., Федоров А.В. Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в море Лаптевых в августе–сентябре // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 755–770.

Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Вазюля С.В., Артемьев В.А., Мошаров С.А., Храпко А.Н. Верификация моделей первичной продукции Карского моря по экспедиционным и спутниковым данным // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 879–889.

Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И., Хлебонашев П.В. Сезонная изменчивость первичной продукции Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 103–117.

Добровольский А.Д., Залогин В.С. Моря СССР. М.: Московский университет, 1982. 192 с.

Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледовый покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.

Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Мошаров С.А., Демидов А.Б. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-AQUA // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21–31.

Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И. Первичная продукция // Биология океана. М.: Наука, 1977. Т. 2: Биологическая продуктивность океана. С. 183–209.

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.
- Мордвинцев И.Н., Платонов Н.Г., Алпацкий И.В.* Многолетняя динамика ледового покрова Арктики по спутниковым микроволновым данным // Исследование Земли из космоса. 2010. № 1. С. 40–47.
- Мошаров С.А.* Распределение первичной продукции и хлорофилла “а” в Карском море в сентябре 2007 г. // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
- Салюк П.А., Степочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А.И.* Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 45–57.
- Салюк П.А., Степочкин И.Е., Букин О.А., Соколова Е.Б., Майор А.Ю., Шамбарова Ю.В., Горбушкин А.Р.* Определение концентрации хлорофилла-а спутниковыми радиометрами MODIS-Aqua и VIIRS в Восточной Арктике и Беринговом море // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 161–172.
- Шалина Е.В.* Изменение ледовитости северных морей России и оценка доступности северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67–78.
- Шеберстов С.В.* Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
- Aitchison J., Brown J.A.C.* The lognormal distribution // *Economic Journal*. 1957. V. 67. P. 713–715.
- 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
- Arrigo K.R., van Dijken G.L.* Continued increases in Arctic Ocean primary production // *Progr. Oceanogr.* 2015. V. 136. P. 60–70.
- Bauch D., Hölemann J., Willmes S., Gröger M., Novikhin A., Nikulina A., Kassens H., Timokhov L.* Changes in distribution of brine waters on the Laptev Sea shelf in 2007 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C11008. doi:10.1029/2010JC006249
- Bauch D., Cherniavskaya E.* Water mass classification on a highly variable Arctic shelf region: origin of Laptev Sea water masses and implications for the nutrient budget // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. № 3. P. 1896–1906. <https://doi.org/10.1002/2017JC013524>
- Behrenfeld M.J., O'Malley R.O., Siegel D.A., McClain C.R., Sarmiento J.L., Feldman G.C., Milligan A.J., Falkowski P.G., Letelier R.M., Boss E.S.* Climate-driven trends in contemporary ocean productivity // *Nature*. 2006. V. 444. P. 752–755.
- Bélanger S., Babin M., Tremblay J.-E.* Increasing cloudiness in Arctic dampens the increase in phytoplankton primary production due to sea ice receding // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 4087–4101.
- Bopp L., Monfray P., Aumont O., Dufresne J.-L., Le Treut H., Madec G., Terray L., Orr J.C.* Potential impact of climate change on marine export primary production // *Global Biogeochem. Cycles*. 2001. V. 15. № 1. P. 81–99.
- Carmack E.C., Macdonald R.W., Jasper S.* Phytoplankton productivity on the Canadian Shelf of the Beaufort Sea // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2004. V. 277. P. 37–50.
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 881–889.
- 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.
- 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.
- Comiso J.C.* The rapid decline of multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. doi:10.1175/JCLI-D11-00113.1
- 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
- Cooper L.W., Benner R., McClelland J.W., Peterson B.J., Holmes R.M., Raymond P.A., Hansell D.A., Grebmeier J.M., Codispoti L.A.* Linkages among runoff, dissolved organic carbon and the stable oxygen isotope composition of seawater and other water mass indicators in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. G02013. doi: 10.1029/2005JG000031
- Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V.* Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms // *J. Sea Res.* 2017. V. 125. P. 1–17.
- 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.
- Dittmar T., Kattner G.* The biogeochemistry of the river and shelf system of the Arctic Ocean: a review // *Mar. Chem.* 2003. V. 83. P. 103–120.
- Falkowski P.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // *J. Plankton Res.* 1981. V. 3. P. 203–216.
- 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.
- 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*. 2012. doi: 10.1117/1112.981264
- Gleitz M., Grossmann S.* Phytoplankton primary production and bacterial production // *Ber. Polarforschung*. 1997. № 226. P. 92–94.
- Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Iakshina D., Kraineva M.* Modeling the impact of the Lena River on the

- Laptev Sea summer hydrography and submarine permafrost state // *Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., etc.* 2015. V. 15. P. 13–22.
- Gregg W.W., Conkright M.E., Ginoux P., O'Reilly J.O., Casey N.W. Ocean primary production and climate: Global decadal changes // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 15. 1809, doi:10.1029/2003GL016889
- Hansell D.A., Kadko D., Bates N.R. Degradation of terrigenous dissolved organic carbon in the Western Arctic Ocean // *Science*. 2004. V. 304. P. 858–861.
- Harrison W.G., Cota G.F. Primary production in the polar waters: relation to nutrient availability // *Pol. Res.* 1991. V. 10. № 1. P. 87–104.
- Heiskanen A.-S., Keck A. Distribution and sinking rates of phytoplankton, detritus and particulate biogenic silica in the Laptev Sea and Lena River (Arctic Siberia) // *Mar. Chem.* 1996. V. 53. P. 229–245.
- 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
- Hill V.J., Matrai P.A., Olson E., Suttles S., Steele M., Codispoti L.A., Zimmerman R.C. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates // *Progr. Oceanogr.* 2013. V. 110. P. 107–125.
- Holmes M.L., Creager Y.S. Holocene history of the Laptev Sea Continental Shelf // *Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas* / Ed. Herman Y. Berlin: Springer, 1974. P. 211–229.
- Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya T., Raymond P.A., Repeta D.J., Staples R., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A. 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.
- Holmes R.M., McClelland J.W., Raymond P.A., Frazer B.B., Peterson B.J., Stieglitz M. Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L03402. doi: 10.1029/2007GL032837
- IOCCG, 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters. Sathyendranath, S. (Ed.). Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada. 140 p.
- 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.
- Juterzenka K.V., Knickmeier K. Chlorophyll *a* distribution in water column and sea ice during the Laptev Sea freeze-up study in Autumn 1995 // *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history* / Eds. Kassens et al. Berlin: Springer, 1999. P. 153–160.
- Juul-Pedersen T., Arendt K.E., Mortensen J., Blicher M.E., Søgaard D.H., Rysgaard S. Seasonal and interannual phytoplankton production in a sub-Arctic tidewater outlet glacier fjord, SW Greenland // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2015. V. 524. P. 27–38.
- 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.
- Le Fouest V., Babin M., Trembley J.-É. The fate of riverine nutrients on Arctic shelves // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. № 6. P. 3661–3677.
- Lee Y.J., Matrai P.A., Friedrichs M.A.M., Saba V.S., Antoine D., Ardyna M., Asanuma I., Babin M., Bélanger S., Benoit-Gagné M., Devred E., Fernández-Mendéz M., Gentili B., Hirawake T., Kang S.-H., Kameda T., Katlein C., Lee S.H., Lee Z., Frédéric M., Scardi M., Smyth T.J., Tang S., Turpie K.R., Waters K.J., Westberry T.K. 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. doi:10.1002/2015/JC11018
- 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.
- 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.
- May R., McLean A. Theoretical ecology: principles and applications. Oxford University Press, Oxford. 2007. 272 p.
- McClelland J.W., Holmes R.M., Dunton K.H., Macdonald R.W. The Arctic Ocean estuary // *Estuar. Coasts*. 2012. V. 35. P. 353–368.
- McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // *Global Biogeochem. Cycles*, 2016. V. 30. P. 629–643.
- Opsahl S., Benner R., Amon R.W. Major flux of terrigenous dissolved organic matter through the Arctic Ocean // *Limnol. Oceanogr.* 1999. V. 44. № 8. P. 2017–2023.
- Osburn C.L., Retamal L., Vincent W.F. Photoreactivity of chromophoric dissolved organic matter transported by the Mackenzie River to the Beaufort Sea // *Mar. Chem.* 2009. V. 115. № 1–2. P. 10–20.
- 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
- Pauly D., Christensen V. Primary production required to sustain global fisheries // *Nature*. 1995. V. 374. P. 255–257.
- Platt T., Sathyendranath S. Latitude as a factor in the calculation of primary production // *Ecology of Fjords and Coastal Waters*. Ed. Skjoldal H.R. Tromsø, 1995. P. 3–13.
- 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.

- 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.
- Rysgaard S., Nielsen T.G., Hansen B.W. Seasonal variation in nutrients, pelagic primary production and grazing in a high-Arctic coastal marine ecosystem, Young Sound, Northeast Greenland // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1999. V. 179. P. 13–25.
- 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.
- 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.
- Sakshaug E., Slagstad D. Light and productivity of phytoplankton in polar marine ecosystems — a physiological view // *Polar Res.* 1991. V. 10. P. 69–85.
- Sarmiento J.L., Slater R., Barber R., Bopp L., Doney S.C., Hirst A.C., Kleypas J., Matear R., Mikolajewicz U., Monfray P., Soldatov V., Spall S.A., Stouffer R. Response of ocean ecosystems to climate warming // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. V. 18. GB3003, doi:10.1029/2003GB002134
- Siegel D.A., Buesseler K.O., Doney S.C., Saille S.F., Behrenfeld M.J., Boyd P.W. Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models // *Global Biogeochem. Cycles*. 2014. V. 28. № 3. P. 181–196.
- 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.
- Sørensen H.L., Meire L., Juul-Pedersen T., de Stigter H.C., Meysman F.J.R., Rysgaard S., Thamdrup B., Glud R.N. Seasonal carbon cycling in a Greenland fjord: an integrated pelagic and benthic study // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2015. V. 539. P. 1–17.
- Sorokin Yu.I., Sorokin P. Yu. Plankton and primary production in the Lena river estuary and in the south-eastern Laptev sea // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 1996. V. 43. P. 399–418.
- Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // *Clim. Change*. 2012. V. 110. P. 1005–1027.
- 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
- The Venice System for the classification of marine waters according to salinity // *Limnol. Oceanogr.* 1958. V. 3. P. 346–347.
- Tuschling K. Phytoplankton ecology in the arctic Laptev Sea — a comparison of three seasons // *Ber. Polarforschung*. 2000. № 347. 144 p.
- Volk T., Hoffert M.I. Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO₂ changes. In *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂ Natural Variations Archean to Present*. Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington. 1985. V. 32. P. 99–110.
- Zenkevitch L.A. *Biology of the seas of the USSR*. London, George Allen and Unwin Ltd., 1963. 953 p.

Seasonal Variability and Annual Laptev Sea Phytoplankton Primary Production Using MODIS-Aqua Data

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

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

Studies of seasonal variability of Laptev Sea water column primary production and evaluation of its annual values were performed using MODIS-Aqua data (2002–2018). To reach that result regional-specific primary production and chlorophyll algorithms were used for the first time. Based on multiyear averaged daily primary production Northwestern and Southeastern regions were distinguished in the Laptev Sea. Seasonal variations in water column primary production in the Northwestern region were characterized by the maximum in June (245 mgC m⁻² d⁻¹). In the Southeastern region and for all Laptev Sea the maximum water column primary production values were denoted from May to July, 273–282 mgC m⁻² d⁻¹ and 256–281 mgC m⁻² d⁻¹, respectively. Daily primary production and annual values of total primary production in the Southeastern region were, respectively, 1.9 and 3 fold higher than in the Northwestern region. Multiyear averaged value of Laptev Sea water column primary production was equal to 125 mgC m⁻² d⁻¹ and total annual primary production was equal to 8 × 10¹² gC.

Keywords: primary production, chlorophyll, seasonal variability, remote sensing, Laptev Sea

REFERENCES

- Aitchison J., Brown J.A.C. The lognormal distribution // *Economic Journal*. 1957. V. 67. P. 713–715.
- Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanickij V.M., Harlanenkova N.E., Yulin A.V. Evolyuciya ploshchadi morskogo ledovogo pokrova Arktiki v usloviyah sovremennyh izmenenij klimata [Arctic sea ice cover

- evolution in contemporary climate changes] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 2. P. 5–19 (In Russian).
- 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
- Arrigo K.R., van Dijken G.L.* Continued increases in Arctic Ocean primary production // *Progr. Oceanogr.* 2015. V. 136. P. 60–70.
- Bauch D., Hölemann J., Willmes S., Gröger M., Novikhin A., Nikulina A., Kassens H., Timokhov L.* Changes in distribution of brine waters on the Laptev Sea shelf in 2007 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C11008. doi:10.1029/2010JC006249
- Bauch D., Cherniavskaya E.* Water mass classification on a highly variable Arctic shelf region: origin of Laptev Sea water masses and implications for the nutrient budget // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. № 3. P. 1896–1906. doi:10.1002/2017JC013524
- Behrenfeld M.J., O'Malley R.O., Siegel D.A., McClain C.R., Sarmiento J.L., Feldman G.C., Milligan A.J., Falkowski P.G., Letelier R.M., Boss E.S.* Climate-driven trends in contemporary ocean productivity // *Nature*. 2006. V. 444. P. 752–755.
- 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. P. 4087–4101.
- Biogeokhimiya okeana [Ocean biogeochemistry]*. Red.: Monin A.S., Lisicin A.P. M.: Nauka, 1983. 368 p. (In Russian).
- Bondur V.G., Keeler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I.* Monitoring zagryazneniy pribrezhnykh akvatoriy s ispolzovaniem mnogospektralnykh sputnikovyykh izobrazheniy vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Monitoring of the pollution of the ocean coastal water areas using space multispectral high resolution imagery] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2006. № 6. P. 42–49. (In Russian).
- Bondur V.G., Vorobyev V.E., Zamshin V.V., Serebryany A.N., Latushkin A.A., Li M.E., Martynov O.V., Hurchak A.P., Grinchenko D.V.* Monitoring anthropogenic impact on some coastal water areas of the Black Sea using multispectral satellite imagery // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, № 9, pp. 1008–1022. doi: 10.1134/S0001433818090098
- Bondur V.G., Zubkov E.V.* Vydelenie melkomasshtabnykh neodnorodnostei opticheskikh kharakteristik verkhnego sloya okeana po mnogoazonalnym sputnikovym izobrazheniyam vysokogo razresheniya. Chast' 1. Effekty zbroza drenazhnykh kanalov v pribrezhnye akvatorii [Showing up the small-scale ocean upper layer optical inhomogeneities by the multispectral space images with the high surface resolution. Part 1. The canals and channels drainage effects at the coastal zone] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2005. № 4. P. 54–61. (In Russian).
- Bopp L., Monfray P., Aumont O., Dufresne J.-L., Le Treut H., Madec G., Terray L., Orr J.C.* Potential impact of climate change on marine export primary production // *Global Biogeochem. Cycles*. 2001. V. 15. № 1. P. 81–99.
- Carmack E.C., Macdonald R.W., Jasper S.* Phytoplankton productivity on the Canadian Shelf of the Beaufort Sea // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2004. V. 277. P. 37–50.
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 881–889.
- 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.
- 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.
- Comiso J.C.* The rapid decline of multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. doi:10.1175/JCLI-D11–00113.1
- 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
- Cooper L.W., Benner R., McClelland J.W., Peterson B.J., Holmes R.M., Raymond P.A., Hansell D.A., Grebmeier J.M., Codispoti L.A.* Linkages among runoff, dissolved organic carbon and the stable oxygen isotope composition of seawater and other water mass indicators in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. G02013. doi: 10.1029/2005JG000031
- Danyushevskaya A.I., Petrova V.I., Yashin D.S.* Organicheskoe veshchestvo donnykh otlozheniy polyarnykh zon Mirovogo okeana [Organic matter of sediments in the World Ocean polar regions]. L.: Nedra, 1990. 280 s. (In Russian).
- Demidov A.B., Gagarin V.I., Arashkevich E.G., Makkaveev P.N., Konyuhov I.V., Vorob'eva O.V., Fedorov A.V.* Spatial Variability of Primary Production and Chlorophyll in the Laptev Sea in August–September // *Oceanology*. 2019. V. 59. № 5.
- Demidov A.B., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Artem'ev V.A., Mosharov S.A., Khrapko A.N.* Verification of Kara Sea primary production models with field and satellite observations // *Oceanology*. 2016. V. 56. № 6. P. 799–808.
- Demidov A.B., Sheberstov S.V., Gagarin V.I., Khlebopashev P.V.* Seasonal variation of the satellite derived phytoplankton primary production in the Kara Sea // *Oceanology*. 2017. № 1. V. 57. P. 91–104.
- Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V.* Modelling Kara Sea phyto-plankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms // *J. Sea Res.* 2017. V. 125. P. 1–17.
- 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.
- Dittmar T., Kattner G.* The biogeochemistry of the river and shelf system of the Arctic Ocean: a review // *Mar. Chem.* 2003. V. 83. P. 103–120.
- Dobrovolskiy A.D., Zalagin V.S.* Morya SSSR [Seas of the USSR]. M.: Moskovskiy universitet, 1982. 192 p. (In Russian).

- Falkowski P.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // *J. Plankton Res.* 1981. V. 3. P. 203–216.
- 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.
- 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.* doi:10.1117/1112.981264
- Grebmeier J.M., Codispoti L.A.* Linkages among runoff, dissolved organic carbon and the stable oxygen isotope composition of seawater and other water mass indicators in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. G02013. doi: 10.1029/2005JG000031
- Gleitz M., Grossmann S.* Phytoplankton primary production and bacterial production // *Ber. Polarforschung.* 1997. № 226. P. 92–94.
- Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Iakshina D., Kraineva M.* Modeling the impact of the Lena River on the Laptev Sea summer hydrography and submarine permafrost state // *Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., etc.* 2015. V. 15. P. 13–22.
- Gregg W.W., Conkright M.E., Ginoux P., O'Reilly J.O., Casey N.W.* Ocean primary production and climate: Global decadal changes // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 15. 1809, doi:10.1029/2003GL016889
- Hansell D.A., Kadko D., Bates N.R.* Degradation of terrigenous dissolved organic carbon in the Western Arctic Ocean // *Science.* 2004. V. 304. P. 858–861.
- Harrison W.G., Cota G.F.* Primary production in the polar waters: relation to nutrient availability // *Pol. Res.* 1991. V. 10. № 1. P. 87–104.
- Heiskanen A.-S., Keck A.* Distribution and sinking rates of phytoplankton, detritus and particulate biogenic silica in the Laptev Sea and Lena River (Arctic Siberia) // *Mar. Chem.* 1996. V. 53. P. 229–245.
- 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
- Hill V.J., Matrai P.A., Olson E., Suttles S., Steele M., Codispoti L.A., Zimmerman R.C.* Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates // *Progr. Oceanogr.* 2013. V. 110. P. 107–125.
- Holmes M.L., Creager Y.S.* Holocene history of the Laptev Sea Continental Shelf // *Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas* / Ed. Herman Y. Berlin: Springer, 1974. P. 211–229.
- Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya T., Raymond P.A., Repeta D.J., Staples R., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A.* 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.
- Holmes R.M., McClelland J.W., Raymond P.A., Frazer B.B., Peterson B.J., Stieglitz M.* Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L03402. doi: 10.1029/2007GL032837
- IOCCG, 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters. Sathyendranath, S. (Ed.). Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada. 140 p.
- 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.
- Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V.* Arkticheskij ledovij pokrov stanovitsya sezonnym? [Is arctic ice cover becoming seasonal?] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2013. № 4. P. 50–65 (In Russian).
- Juterzenka K.V., Knickmeier K.* Chlorophyll a distribution in water column and sea ice during the Laptev Sea freeze-up study in Autumn 1995 // *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history* / Eds. Kassens et al. Berlin: Springer, 1999. P. 153–160.
- Juul-Pedersen T., Arendt K.E., Mortensen J., Blicher M.E., Søgaard D.H., Rysgaard S.* Seasonal and interannual phytoplankton production in a sub-Arctic tidewater outlet glacier fjord, SW Greenland // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2015. V. 524. P. 27–38.
- 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.
- Koblenc-Mishke O.I., Vedernikov V.I.* Pervichnaya produkciya [Primary production] // *Biologiya okeana. M.: Nauka, 1977. T.2: Biologicheskaya produktivnost' okeana.* P. 183–209 (In Russian).
- 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.
- Kuznetsova O.A., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Mosharov S.A., Demidov A.B.* Otsenka koncentracii khlorofilla v Karskom more po dannym sputnikovogo skanera MODIS-AQUA [Estimation of Chlorophyll Concentration in the Kara Sea from Data of MODIS-Aqua Satellite Scanner] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2013. № 5. P. 21–31 (In Russian).
- Le Fouest V., Babin M., Trembley J.-É.* The fate of riverine nutrients on Arctic shelves // *Biogeosciences.* 2013. V. 10. № 6. P. 3661–3677.
- Lee Y.J., Matrai P.A., Friedrichs M.A.M., Saba V.S., Antoine D., Ardyna M., Asanuma I., Babin M., Bélanger S., Benoît-Gagné M., Devred E., Fernández-Méndez M., Gentili B., Hirawake T., Kang S.-H., Kameda T., Katlein C., Lee S.H., Lee Z., Frédéric M., Scardi M., Smyth T.J., Tang S., Turpie K.R., Waters K.J., Westberry T.K.* 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. doi:10.1002/2015/JC11018
- 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.
- Lisicin A.P.* Rasseyyannyj osadochnyj material biosfery morej i okeanov [Dispersed sediments of the biosphere in the seas and the oceans] // *Mirovoy okean. T. 2. Fizika, himiya i biologiya okeana. Osadkoobrazovanie v okeane i vzaimodejstvie geosfer Zemli.* Red. Nigmatulin R.I., Lobkovskij L.I. M.: Nauchnyj mir, 2014. P. 424–464 (In Russian).
- May R., McLean A.* Theoretical ecology: principles and applications. Oxford University Press, Oxford. 2007. 272 p.
- McClelland J.W., Holmes R.M., Dunton K.H., Macdonald R.W.* The Arctic Ocean estuary // *Estuar. Coasts.* 2012. V. 35. P. 353–368.
- McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G.* Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // *Global Biogeochem. Cycles*, 2016. V. 30. P. 629–643.
- Mordvintsev I.N., Platonov N.G., Alpatskij I.V.* Mnogoletnyaya dinamika ledovogo pokrova Arktiki po sputnikovym mikrovolnovym dannym [Multi-years Arctic ice dynamics with satellite microwave data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2010. № 1. P. 40–47 (In Russian).
- Mosharov S.A.* Distribution of the primary production and chlorophyll *a* in the Kara Sea in September of 2007 // *Oceanology.* 2010. V. 50. № 6. P. 885–893.
- Opsahl S., Benner R., Amon R.W.* Major flux of terrigenous dissolved organic matter through the Arctic Ocean // *Limnol. Ocenogr.* 1999. V. 44. № 8. P. 2017–2023.
- Osburn C.L., Retamal L., Vincent W.F.* Photoreactivity of chromophoric dissolved organic matter transported by the Mackenzie River to the Beaufort Sea // *Mar Chem.* 2009. V. 115. № 1–2. P. 10–20.
- 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
- Pauly D., Christensen V.* Primary production required to sustain global fisheries // *Nature.* 1995. V. 374. P. 255–257.
- Platt T., Sathyendranath S.* Latitude as a factor in the calculation of primary production // *Ecology of Fjords and Coastal Waters.* Ed. Skjoldal H.R. Tromsø, 1995. P. 3–13.
- 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.
- 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.
- Rysgaard S., Nielsen T.G., Hansen B.W.* Seasonal variation in nutrients, pelagic primary production and grazing in a high-Arctic coastal marine ecosystem, Young Sound, Northeast Greenland // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1999. V. 179. P. 13–25.
- 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.
- 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.
- Sakshaug E., Slagstad D.* Light and productivity of phytoplankton in polar marine ecosystems — a physiological view // *Polar Res.* 1991. V. 10. P. 69–85.
- Salyuk P.A., Stepanov I.E., Bukin O.A., Sokolova E.B., Major A.YU., Shambarova Yu.V., Gorbushkin A.R.* Opredelenie koncentracii hlorofilla-a sputnikovymi radiometrami MODIS-Aqua i VIIRS v Vostochnoj Arktike i Beringovom more [Determination of chlorophyll-a concentration using MODIS-Aqua and VIIRS satellite radiometers in the Western Arctic and the Bering Sea] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2016. № 1–2. P. 161–172 (In Russian).
- Salyuk P.A., Stepanov I.E., Golik I.A., Bukin O.A., Pavlov A.N., Aleksanin A.I.* Razrabotka empiricheskikh algoritmov vosstanovleniya koncentracii hlorofilla-a i okrajnykh rastvorenykh organicheskikh veshchestv dlya dal'nevostochnyh morej iz distancionnykh dannyh po cvetu vodnoj poverhnosti [Evaluation of empirical algorithms of chlorophyll-a and dissolved colored organic matter concentrations retrieval for Far Eastern Seas with remote surface color data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2013. № 3. P. 45–57 (In Russian).
- Sarmiento J.L., Slater R., Barber R., Bopp L., Doney S.C., Hirst A.C., Kleypas J., Matear R., Mikolajewicz U., Monfray P., Soldatov V., Spall S.A., Stouffer R.* Response of ocean ecosystems to climate warming // *Global Biogeochem. Cycles.* 2004. V. 18. GB3003, doi:10.1029/2003GB002134
- Shalina E.V.* Izmenenie ledovitosti severnykh morej Rossii i ocenka dostupnosti severnogo morskogo puti po dannym sputnikovogo monitoringa [Changes in northern Russian Seas ice cover and estimation of Northern Sea Route accessibility with satellite monitoring data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2015. № 4. P. 67–78 (In Russian).
- Sheberstov S.V.* Sistema paketnoj obrabotki okeanologicheskikh sputnikovyykh dannyh [Batch processing system of treatment of oceanographic satellite data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2015. V. 12. № 6. P. 154–161 (In Russian).
- Siegel D.A., Buesseler K.O., Doney S.C., Saille S.F., Behrenfeld M.J., Boyd P.W.* Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models // *Global Biogeochem. Cycles.* 2014. V. 28. № 3. P. 181–196.
- 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.

- Sørensen H.L., Meire L., Juul-Pedersen T., de Stigter H.C., Meysman F.J.R., Rysgaard S., Thamdrup B., Glud R.N.* Seasonal carbon cycling in a Greenland fjord: an integrated pelagic and benthic study // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2015. V. 539. P. 1–17.
- Sorokin Yu.I., Sorokin P. Yu.* Plankton and primary production in the Lena river estuary and in the south-eastern Laptev sea // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 1996. V. 43. P. 399–418.
- Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P.* The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // *Clim. Change.* 2012. V. 110. P. 1005–1027.
- 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
- The Venice System for the classification of marine waters according to salinity // *Limnol. Oceanogr.* 1958. V. 3. P. 346–347.
- Tuschling K.* Phytoplankton ecology in the arctic Laptev Sea — a comparison of three seasons // *Ber. Polarforschung.* 2000. № 347. 144 p.
- Vedernikov V.I., Demidov A.B., Sud'bin A.I.* Primary production and chlorophyll in the Kara Sea in September 1993 // *Oceanology.* 1995. V. 4. № 5. P. 630–640.
- Vetrov A.A., Romankevich E.A.* Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012 // *Dokl. Earth Sci.* 2014. V. 454. P. 44–46.
- Vetrov A.A., Romankevich E.A., Belyaev N.A.* Chlorophyll, primary production, fluxes, and balance of organic carbon in the Laptev Sea // *Geochemistry International.* 2008. V. 46. № 10. P. 1055–1063.
- Vinogradov M.E.* Razvitie pelagicheskikh soobshchestv i bioticheskij balans okeana [Evolution of pelagic communities and biotic balance of the Ocean] // *Okeanologiya na starte XXI veka.* Red. Vereshchaka A.L. Moscow, Nauka, 2008. P. 257–292 (In Russian).
- Vinogradov M.E., Vedernikov V.I., Romankevich E.A., Vetrov A.A.* Components of the carbon cycle in the Russian Arctic Seas: primary production and flux of Corg from the photic layer // *Oceanology.* 2000. V. 40. № 2. P. 204–215.
- Volk T., Hoffert M.I.* Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO₂ changes. In *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂ Natural Variations Archean to Present.* Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington. 1985. V. 32. P. 99–110.
- Zenkevitch L.A.* *Biology of the seas of the USSR.* London, George Allen and Unwin Ltd., 1963. 953 p.