

УДК 581.132:574.583

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

© 2020 г. А. Б. Демидов¹, *, В. И. Гагарин¹, С. В. Шеберстов¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: demspa@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.05.2020 г.

После доработки 19.05.2020 г.

Принята к публикации 22.06.2020 г.

Исследование межгодовой (2002–2018 гг.) изменчивости первичной продукции, температуры воды на поверхности (T_0), фотосинтетически активной радиации (ФАР) и площади ледового покрова проведено в Восточно-Сибирском море (ВСМ) по данным сканера цвета океана MODIS-Aqua. За 17-летний период годовая первичная продукция в ВСМ ($ПП_{\text{tot}}$) сократилась на 1.7 ТгС. Это уменьшение происходило со скоростью 0.1 ТгС или 1.38% в год. Оно сопровождалось уменьшением первичной продукции, нормированной на единицу площади (ИПП). За исследованный период среднегодовая величина ИПП уменьшилась на 13 мгС/м² в день. В среднем за год ИПП уменьшалась на 0.76 мгС/м² в день или на 0.84%. Уменьшение первичной продукции в ВСМ происходило на фоне незначительного положительного тренда T_0 ($R^2 = 0.09$) и статистически значимого отрицательного тренда ФАР ($R^2 = 0.29$). За 17 лет T_0 в регионе увеличилась на 0.68°C (0.04°C или 3.2% в год), а ФАР уменьшилась на 3.4 Ein/м² в день. Среднегодовая ФАР сокращалась на 0.2 Ein/м² в день или на 1.9% в год. Площадь, свободная ото льда, за исследованный период сократилась на 64.94×10^3 км² ($R^2 = 0.10$), что составляло 3.82×10^3 км² или 0.87% в год. Изменения уровня первичной продуктивности ВСМ за последние 17 лет были связаны не только с динамикой ледового покрова, но и с сокращением поступления фотосинтетически активной радиации и уменьшением удельной первичной продукции.

Ключевые слова: годовая первичная продукция, межгодовая изменчивость, Восточно-Сибирское море

DOI: 10.31857/S0030157420050044

ВВЕДЕНИЕ

Происходящее в последние десятилетия потепление Арктического океана (АО) определяет изменения его экосистем [14, 17, 41, 43, 46, 48]. Положительный долговременный тренд в изменении температуры воды в АО приводит к сокращению площади и толщины ледового покрова, раннему таянию и более позднему ледоставу, что является причиной увеличения свободных ото льда акваторий и удлинения вегетационного сезона [19, 26–28, 36–39, 42]. Межгодовые изменения первичной продукции фитопланктона (ПП), ключевого звена океанических экосистем, в полной мере отражают воздействие климата, и могут проявляться в росте ее годовых величин ($ПП_{\text{tot}}$) [2, 11, 12, 31, 33, 44]. Отмечается также, что это увеличение может происходить с разной скоростью в различных регионах АО [12]. Более того, в масштабе отдельно взятого моря рост $ПП_{\text{tot}}$ протекает с разной интенсивностью различных его районах [6].

Однако недавние исследование межгодовой изменчивости первичной продукции на регио-

нальном уровне показали, что долговременная динамика $ПП_{\text{tot}}$ может быть не только положительной, но и отрицательной, а знак тренда может зависеть от пространственно-временного масштаба исследования [7]. Так, в цитируемой работе показано, что в море Лаптевых в период с 2002 по 2018 гг. происходило не увеличение, а уменьшение ПП.

Исследования межгодовых изменений $ПП_{\text{tot}}$ Восточно-Сибирского моря (ВСМ) ранее были проведены с 1998 по 2006 гг. [31], с 1998 по 2010 гг. [33], с 1998 по 2012 гг. [12], с 2003 по 2012 гг. [2] и в 2003–2013 гг. [29]. В настоящее время долговременные изменения $ПП_{\text{tot}}$ этого региона можно провести, опираясь на более длительный, чем в предыдущих работах временной ряд.

Представленная статья является заключительной в серии работ, в которых нами были проведены исследования межгодовой изменчивости морей Сибирской Арктики [6, 7]. Ее целями являлись: (1) – описание межгодовых изменений $ПП_{\text{tot}}$ и сопутствующих факторов среды в различных районах Восточно-Сибирского моря с 2002

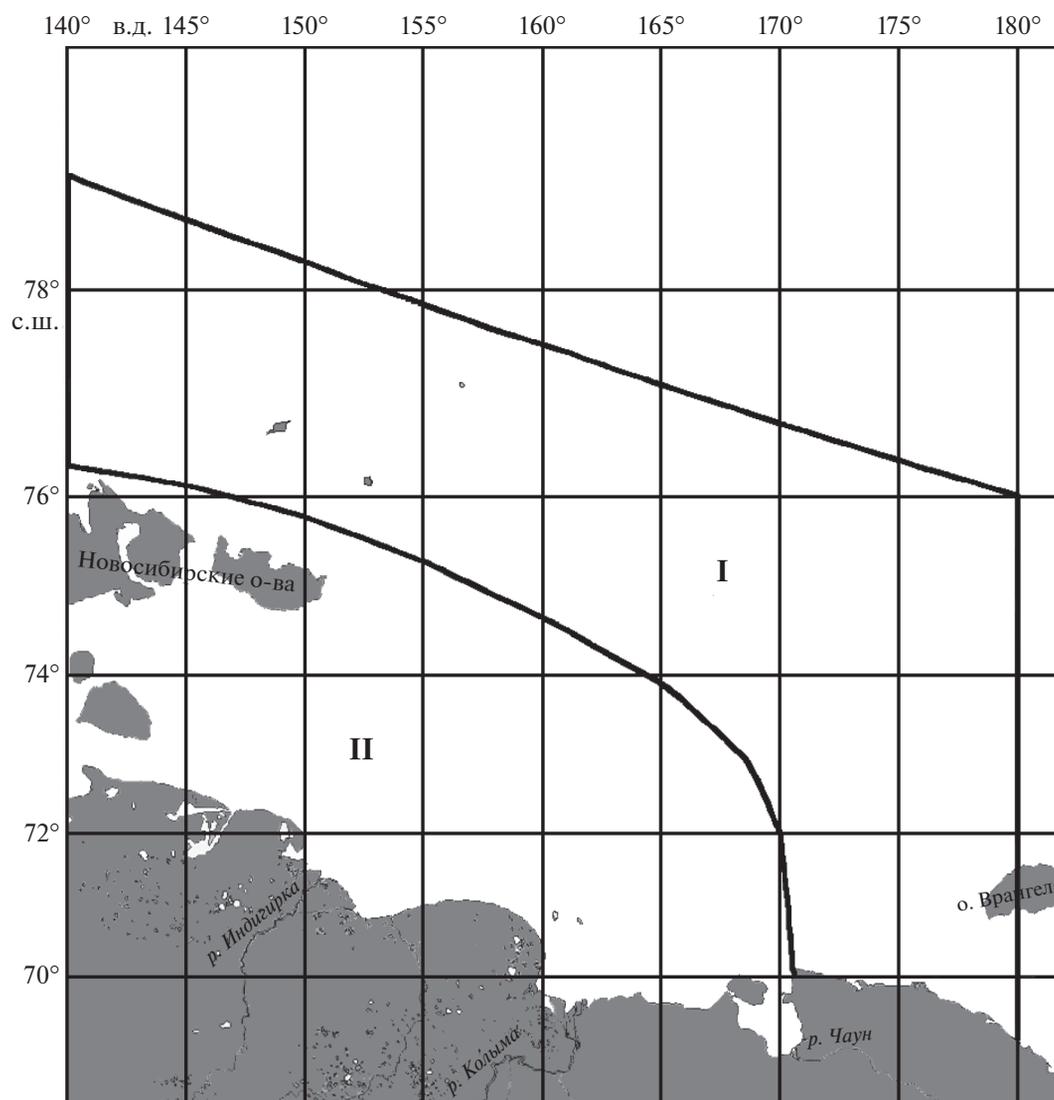


Рис. 1. Районы Восточно-Сибирского моря, в которых были исследованы межгодовые изменения первичной продукции и абиотических параметров: I – Северо-Восточный; II – Юго-Западный.

по 2018 г. и (2) – оценка влияния на эту изменчивость абиотических факторов, таких как площадь ледового покрова ($S_{л}$), температура воды на поверхности, фотосинтетически активная радиация (ФАР).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Районирование и границы Восточно-Сибирского моря. Исследования межгодовой изменчивости первичной продукции и абиотических факторов были проведены для всего ВСМ в границах, которые принимались ранее для оценки годовой величины ПП [24], и его двух районов: Северо-Восточного и Юго-Западного, различающихся по уровню продуктивности в 2 раза [5] (рис. 1). Границей между этими районами было принято среднее многолетнее положение изогалины 25 psu

[8, 32], которую в морях Сибирской Арктики принимают за границу между распресненными и морскими водами [34].

Экспедиционные и спутниковые данные. Экспедиционные данные, на основе которых была разработана эмпирическая модель ПП, получены в 63-м и 69-м рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш”, проведенных в восточной части моря Лаптевых (14 станций) и ВСМ (10 станций) в сентябре 2015 и 2017 гг. соответственно [3, 4].

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 [24].

Температурные файлы OI SST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) с пространствен-

ным 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 [35].

Площадь акватории покрытой льдом рассчитывалась по первичным данным, полученным с сайта ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202_v2/north/daily [20]. При расчете первичной продукции фитопланктона свободной ото льда считалась акватория, если $S_{\text{л}}$ была $<15\%$ [18]. 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 эти месяцы 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 [10]. Значения спектральной яркости моря $R_{\text{rs}}(\lambda_i)$ были пересчитаны в величины концентрации хлорофилла “а” ($X_{\text{л}}$) на поверхности ($X_{\text{л}0}$) по региональному алгоритму [9]. Данные по ФАР использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua [23]. Основные подходы к обработке спутниковых данных были неоднократно описаны ранее при исследовании долговременной изменчивости ПП морей Сибирской Арктики [6, 7].

Региональные модели ПП и $X_{\text{л}}$. Для исследования межгодовой изменчивости ПП Восточно-Сибирского моря нами была применена простая продукционная модель, использующая в качестве входящих параметров величины $X_{\text{л}0}$ и ФАР [16, 21]. При разработке данного алгоритма был использован подход, согласно которому коэффициенты модели принимаются как средние величины для региона исследования [30]. В их качестве выступают средние для ВСМ значения эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды (ψ) [22] и индекс вертикального распределения $X_{\text{л}}$ (k). Значения этих коэффициентов рассчитаны с использованием данных, полученных в экспедициях (см. выше) по следующим формулам:

$$\psi = \text{ДАЧ}_{\text{ср}} / I_0,$$

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

$$k = X_{\text{лfc}} / X_{\text{л}0},$$

где $X_{\text{лfc}}$ – интегральное значение $X_{\text{л}}$ в слое фотосинтеза.

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

$$\text{ИПП} = \psi k X_{\text{л}0} I_0.$$

Распределение произведения ψk имеет логнормальный вид [21], при котором целесообразно использовать среднюю геометрическую величину (G) [13]. Эта величина была рассчитана по данным 24-х станций, выполненных в восточной части моря Лаптевых и в ВСМ (см. выше). Для всей акватории ВСМ $G = 7.62$. Таким образом, итоговое уравнение модели имеет вид

$$\text{ИПП} = 7.62 X_{\text{л}0} I_0.$$

Известно, что стандартный алгоритм MODIS завывает величины концентрации $X_{\text{л}0}$ в водах второго оптического типа [25]. Поэтому, для более точного расчета $X_{\text{л}0}$ 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 $X_{\text{л}0}$ 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 $X_{\text{л}0}$, разработанная ранее для Карского моря [9], где наилучшая корреляция измеренных и расчетных величин $X_{\text{л}}$ ($R^2 = 0.47$; $N = 185$) была получена при использовании отношения коэффициентов спектральной яркости моря $R_{\text{rs}}(531)/R_{\text{rs}}(547)$:

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

Расчет среднемесячных и среднегодовых значений. 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 $X_{\text{л}0}$, 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 $X_{\text{л}0}$ 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 ПП_{tot} рассчитывалось умножением среднемноголетней величины ИПП на площадь исследуемой акватории.

Таблица 1. Параметры линейного тренда межгодовых (2002–2018 гг.) изменений первичной продукции и факторов среды в Восточно-Сибирском море

Район	Статистический показатель	ИПП	ПП _{тот}	ФАР	T	$S_{л}$	$S_{с}$
Юго-Западный	\bar{M}	120	6	7.9	1.84	255	213
	Тренд	-1.3	-0.07	-0.2	0.07	0.94	-0.71
	Тренд, %	-1.1	-1.3	-1.9	3.1	0.4	-0.3
	R^2	0.11	0.07	0.29	0.14	0.02	0.02
	p	0.194	0.320	0.027	0.139	0.581	0.581
Северо-Восточный	\bar{M}	68	3	6.4	0.75	307	181
	Тренд	-0.8	-0.03	-0.2	0.03	0.47	-0.06
	Тренд, %	-1.1	-1.3	-2.3	4.1	0.02	-0.05
	R^2	0.16	0.05	0.25	0.03	0.002	0.002
	p	0.115	0.373	0.041	0.493	0.851	0.851
Все море	\bar{M}	91	9	7.1	1.26	556	400
	Тренд	-0.76	-0.1	-0.2	0.04	4.76	-3.82
	Тренд, %	-0.84	-1.38	-1.9	3.2	0.79	-0.87
	R^2	0.06	0.09	0.29	0.09	0.10	0.10
	p	0.300	0.235	0.027	0.235	0.214	0.214

Примечание. \bar{M} – средняя многолетняя (2002 – 2018 гг.) величина; тренд представлен в абсолютных и относительных (%) значениях в год; R^2 – коэффициент детерминации; p – уровень значимости. Выделены значения, характеризующие статистически значимые тренды при $p < 0.05$ и $N = 17$. Параметры: первичная продукция в столбе воды (ИПП, мгС/м² в день), годовая первичная продукция (ПП_{тот}, ТгС), фотосинтетически активная радиация (ФАР, Ein/м² в день), температура воды на поверхности (T_0 , °С), площадь ледового покрытия ($S_{л}$, ×10³ км²) и площадь, свободная ото льда ($S_{с}$, ×10³ км²)

РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение последних 17-ти лет (2002–2018 гг.) в ВСМ отмечен положительный, но статистически незначимый тренд температуры воды на поверхности (T_0) ($R^2 = 0.09$) (рис. 2; табл. 1). За исследованный период для всего моря T_0 увеличилась на 0.68°С. Температура воды возрастала в среднем на 0.04°С или на 3.2% в год. Статистически незначимые положительные тренды T_0 зарегистрированы также в Юго-Западном ($R^2 = 0.14$) и Северо-Восточном ($R^2 = 0.03$) районах моря. В Юго-Западном районе увеличение T_0 за 17 лет составило 1.19°С (0.07°С или 3.1% в год), а в Северо-Восточном районе это возрастание оказалось равным 0.51°С, при этом T_0 увеличивалась на 0.03°С или 4.1% в год.

В отличие от T_0 среднегодовые значения дневной ФАР в ВСМ статистически значимо ($p < 0.05$) уменьшались во всех его районах и для моря в целом (R^2 от 0.25 до 0.29) (рис. 3; табл. 1). Причем, уменьшение дневной ФАР происходило практически с одинаковой скоростью на всех выделенных акваториях. В Юго-Западном районе уровень ФАР сократился на 3.4 Ein/м² в день. Сокращение среднегодовых значений происходило со скоростью 0.2 Ein/м² в день или на 1.9% в год. В Северо-Восточном районе общее уменьшение дневной ФАР также составило 3.4 Ein/м² в день (0.2 Ein/м² в день или 2.3% в год). Такая же величина общего уменьшения дневной ФАР рассчи-

тана и для всего ВСМ. Среднегодовые значения в ВСМ уменьшались со скоростью 0.2 Ein/м² в день, что составило 1.9% в год.

Среднегодовая площадь ледового покрова имела тенденцию к незначительному увеличению во всех районах и в ВСМ в целом (рис. 4). Следует отметить, что это увеличение было статистически незначимым (табл. 1). Рост площади ледового покрытия в Юго-Западном, Северо-Восточном районах и на всей акватории ВСМ происходил со скоростью 0.4%, 0.02% и 0.79% в год соответственно. Обратная тенденция была отмечена для площадей, свободных ото льда ($S_{с}$) (рис. 4; табл. 1). В целом в ВСМ за 17 лет среднегодовая $S_{л}$ увеличилась на 13% (80.92×10^3 км²).

Описанная выше межгодовая изменчивость абиотических параметров в ВСМ привела к незначительным отрицательным межгодовым трендам ПП_{тот} с 2002 по 2018 гг. (рис. 5). В исследованный период ПП_{тот} слабо и статистически незначимо уменьшалась во всех районах и в целом на акватории моря. Это уменьшение в Юго-Западном, Северо-Восточном и в целом для ВСМ составило 0.07, 0.03 и 0.17 ТгС в год или от 1.3 до 1.38% в год (табл. 1). Всего за 17 лет ПП_{тот} ВСМ уменьшилась на 1.7 ТгС. В Северо-Восточном районе величина ПП_{тот} сократилась на 1.19 ТгС, а в Юго-Западном – на 0.51 ТгС.

Так же как и для ПП_{тот}, отрицательные, но статистически незначимые тренды были отмечены в

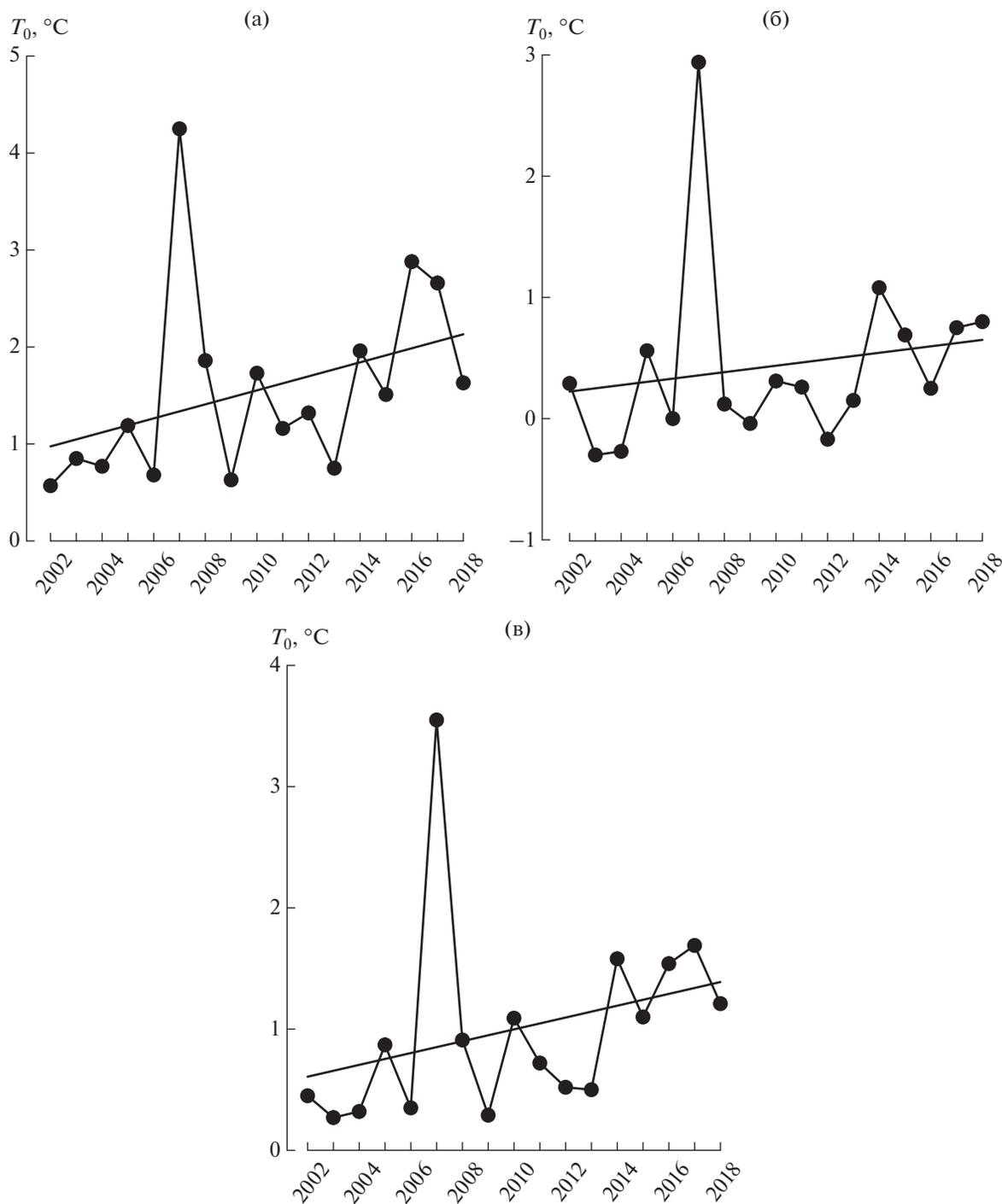


Рис. 2. Межгодовые изменения и линейные тренды температуры воды на поверхности (T_0) в Восточно-Сибирском море в период с 2002 по 2018 гг. (а) – Юго-Западный район; (б) – Северо-Восточный район; (в) – вся акватория Восточно-Сибирского моря.

межгодовых изменениях ИПП (ПП нормированной на единицу площади, $\text{мгС}/\text{м}^2$ в день) в выделенных нами районах и в ВСМ в целом (рис. 6, табл. 1). Уменьшение среднегодовой ИПП за 17 лет в Юго-Западном, Северо-Восточном районах и на всей акватории ВСМ составило 1.3, 0.8 и

0.76 $\text{мгС}/\text{м}^2$ в день соответственно, или от 0.84 до 1.1% в год (табл. 1). Общее уменьшение ИПП за 17 лет для всей акватории моря составило 13 $\text{мгС}/\text{м}^2$ в день. Для Юго-Западного района оно равнялось 22 $\text{мгС}/\text{м}^2$ в день, а для Северо-Восточного района – 14 $\text{мгС}/\text{м}^2$ в день.

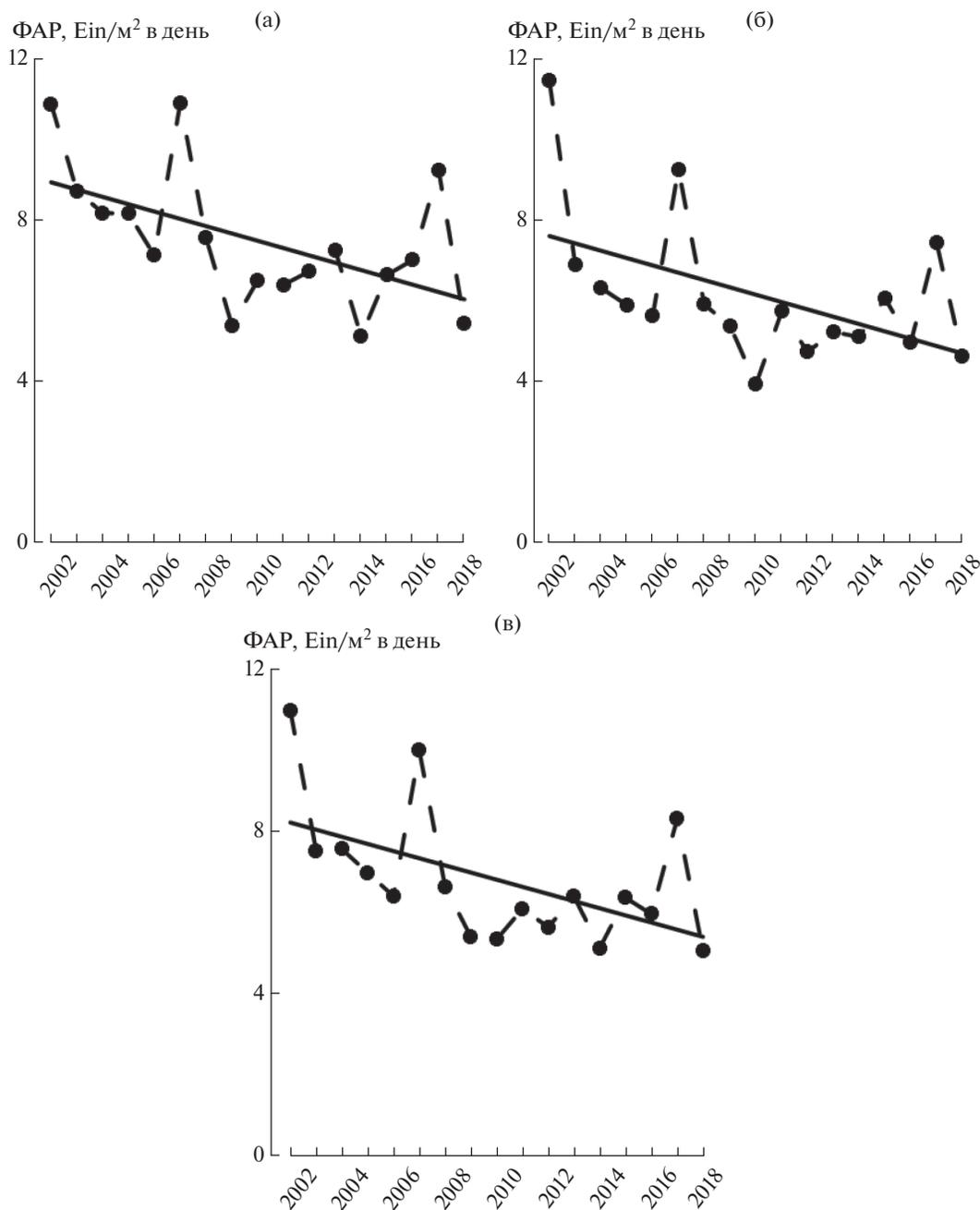


Рис. 3. Межгодовые изменения и линейные тренды фотосинтетически активной радиации (ФАР) в Восточно-Сибирском море в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

ПП_{тог} достоверно зависела от площади свободной ото льда во всех районах и в целом в ВСМ при высоких коэффициентах детерминации (R^2 от 0.70 до 0.75, $p < 0.05$) (табл. 2). Также достоверная корреляция отмечена для связи ПП_{тог} с ФАР (R^2 от 0.42 до 0.82, $p < 0.05$). Так же как и для первых двух параметров, значимая связь ПП_{тог} с T_0 была зарегистрирована в Юго-Западном ($R^2 = 0.26$, $p < 0.05$), Северо-Восточном районах ($R^2 = 0.49$, $p < 0.05$) и в целом в ВСМ ($R^2 = 0.31$, $p < 0.05$) (табл. 2). Так же

как и ПП_{тог}, значения ИПП были тесно связаны с ФАР во всех районах ВСМ (R^2 от 0.44 до 0.78, $p < 0.05$). С поверхностной температурой ИПП была статистически значимо связана только в Северо-Восточном районе ($R^2 = 0.26$, $p < 0.05$) (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Межгодовая изменчивость первичной продукции и абиотических факторов. В настоящей работе показано, что ПП_{тог} ВСМ в течение 17-ти лет с 2002

Таблица 2. Статистические показатели линейных ($y = a + bx$) зависимостей годовой первичной продукции (ПП_{тот}, ТгС) от среднегодовых величин площади, свободной ото льда (S_c , $\times 10^3$ км²), температуры воды на поверхности (T_0 , °С) и фотосинтетически активной радиации (ФАР, Еип/м² в день) в Восточно-Сибирском море

Переменные	Статистический показатель	Юго-Западный район	Северо-Восточный район	Все море
$y - \text{ПП}_{\text{тот}}, x - S_c$	a	-4.63	-1.30	-3.02
	b	0.04	0.02	0.02
	R^2	0.74	0.75	0.70
	p	0.000	0.000	0.000
$y - \text{ПП}_{\text{тот}}, x - T_0$	a	3.14	1.81	4.87
	b	0.77	0.72	1.45
	R^2	0.26	0.49	0.31
	p	0.036	0.002	0.119
$y - \text{ПП}_{\text{тот}}, x - \text{ФАР}$	a	-1.56	0.44	1.07
	b	0.78	0.28	-1.00
	R^2	0.82	0.42	0.73
	p	0.000	0.005	0.000

Примечание. y и x – зависимая и независимая переменные соответственно; a и b – свободный член и коэффициент линейной регрессии соответственно; R^2 – коэффициент детерминации; p – уровень значимости, выделены статистически значимые параметры при $p < 0.05$ и $N = 17$.

Таблица 3. Статистические показатели линейных ($y = a + bx$) зависимостей среднегодовых значений первичной продукции в столбе воды (ИПП, мгС/м² в день) от среднегодовых величин температуры воды на поверхности (T_0 , °С) и фотосинтетически активной радиации (ФАР, Еип/м² в день) в Восточно-Сибирском море

Переменные	Статистический показатель	Юго-Западный район	Северо-Восточный район	Все море
$y - \text{ИПП}, x - T_0$	a	93.19	59.17	75.39
	b	9.92	8.24	9.27
	R^2	0.16	0.26	0.22
	p	0.109	0.035	0.057
$y - \text{ИПП}, x - \text{ФАР}$	a	14.66	28.62	41.27
	b	12.49	5.58	6.37
	R^2	0.78	0.71	0.44
	p	0.000	0.000	0.003

Примечание. y и x – зависимая и независимая переменные соответственно; a и b – свободный член и коэффициент линейной регрессии соответственно; R^2 – коэффициент детерминации; p – уровень значимости, выделены статистически достоверные параметры при $p < 0.05$ и $N = 17$.

по 2018 гг. уменьшалась на 0.1 ТгС или 1.38% в год. Общее сокращение ПП_{тот} за этот период составило 1.7 ТгС. Это уменьшение происходило на фоне статистически значимого отрицательного тренда ФАР и незначительных положительных трендов температуры воды на поверхности и площади ледового покрытия (табл. 1).

Значение отмеченного нами положительного тренда T_0 в ВСМ (0.04°С в год) хорошо согласуется с характером межгодовых изменений этого показателя для всего АО. Так, в период с 1982 по 2018 г. T_0 для августа возрастала в разных регионах АО со скоростью приблизительно от 0.03 до 0.1°С в год [40].

Статистически значимые связи ПП_{тот} с T_0 отмечены для всех районов ВСМ и для моря в целом. Ранее исследования этой зависимости в

Карском море и море Лаптевых показали статистически значимые связи только в отдельных районах этих морей [6, 7]. Связь между ПП_{тот} и T_0 не всегда прослеживается в явном виде. Это связано с тем, что влияние температуры на временную динамику ПП может осуществляться опосредованно через сокращение площади ледового покрытия и изменение глубины верхнего перемешанного слоя, которая регулирует поток биогенных элементов в эвфотическую зону [44].

Как и в соседнем море Лаптевых [7], в ВСМ зарегистрированы статистически значимые положительные связи ПП_{тот} и ИПП с уровнем ФАР (табл. 2 и 3). Следует отметить, что такая зависимость частично объясняется особенностью применяемого в настоящей работе производственного алгоритма, в формулу расчета которого ФАР вхо-

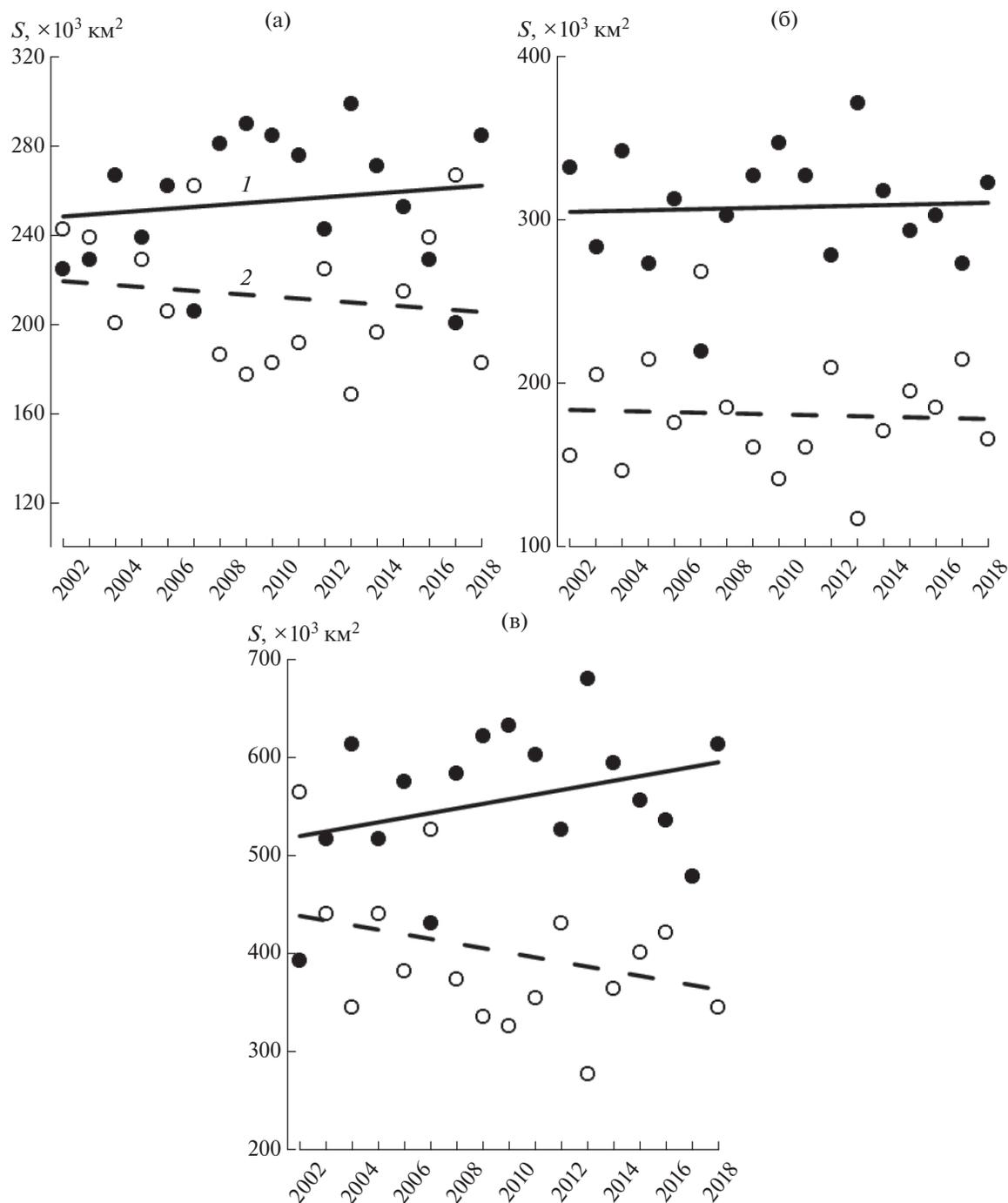


Рис. 4. Межгодовые изменения площади ледового покрытия (1) и площади, свободной ото льда (2) в Восточно-Сибирском море в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

дит непосредственно. Ранее было показано, что в период роста среднегодовых значений температуры и сокращения площади ледового покрова, увеличение облачности и, как следствие, сокращение ФАР в АО может тормозить рост первичной продукции [15]. Уменьшение ФАР в АО отмечено также в периоды с 1998 по 2006 гг. [31] и с 1998 по 2010 гг. [33].

Так же как в случае $ПП_{\text{tot}}$, межгодовые изменения ИПП в ВСМ были слабыми при отрицательном тренде (табл. 1). Ранее аналогичная картина долговременной изменчивости ИПП была отмечена и в других морях Сибирской Арктики. Так, исследование межгодовой изменчивости ИПП Карского моря показало, что интенсивность фотосинтеза в период с 2002 по 2016 гг. в различных

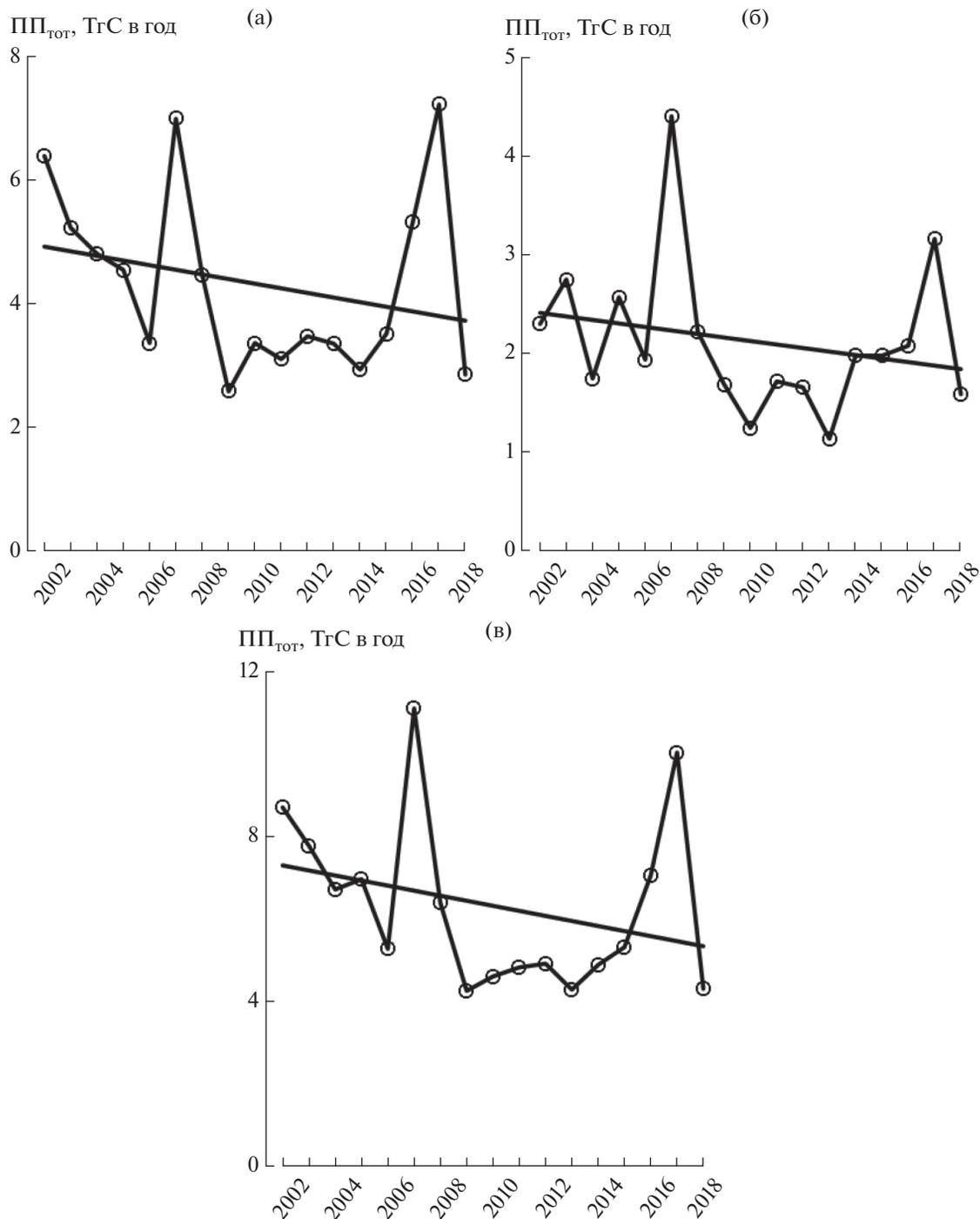


Рис. 5. Межгодовые изменения и линейные тренды первичной продукции (ПП_{Тот}), в Восточно-Сибирском море в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

районах моря изменялась статистически недостоверно ($R^2 = 0.00–0.17$) [6]. В море Лаптевых межгодовая изменчивость ИПП была выражена лучше. Значения коэффициента детерминации для разных его районов и всего моря находились в пределах от 0.10 до 0.28. Так же как и в ВСМ, в море Лаптевых был отмечен отрицательный тренд

этого показателя [7]. Интересно отметить тот факт, что самые значительные отрицательные межгодовые тренды ИПП были отмечены в Карском море, море Лаптевых и ВСМ (рис. 6) в их северных районах. Пока этот факт мы можем лишь констатировать. Последующие работы призваны дать ему объяснение.

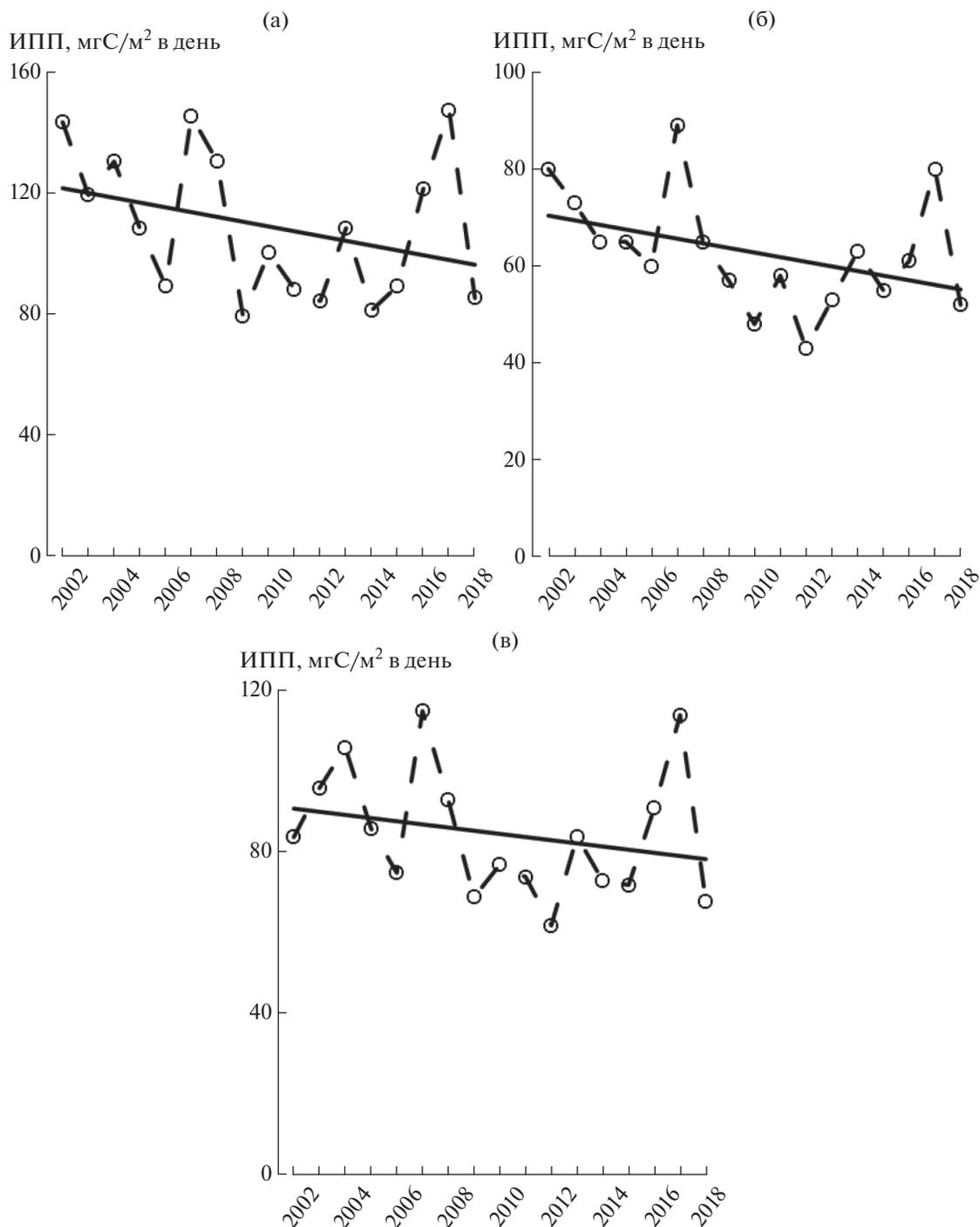


Рис. 6. Межгодовые изменения и линейные тренды первичной продукции, нормированной на единицу площади (ИПП) в Восточно-Сибирском море в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

Логично предположение о существовании тесной статистической связи между PP_{TOT} и ИПП. В ВСМ значения R^2 в Юго-Западном, Северо-Восточном и для всей акватории составляли 0.87, 0.75 и 0.80 соответственно. Следует отметить, что в других морях Сибирской Арктики эта зависимость не была столь сильно выражена. Так, в Кар-

ском море изменчивость суммарной годовой первичной продукции зависела от интенсивности фотосинтеза в разных районах на 9–60%. Для всего Карского моря эта величина составила 34%. В разных районах моря Лаптевых PP_{TOT} зависела от уровня ИПП на 51–77%, а для всего моря на 58% [7].

О влиянии удельной интенсивности фотосинтеза на рост $ПП_{\text{tot}}$ АО нет единого мнения. По данным 1998–2006 гг. было сделано предположение о том, что ИПП АО возрастает вместе с $ПП_{\text{tot}}$ [31]. Другие авторы не отмечали подобного эффекта [11, 47]. По последним данным интенсивность фотосинтеза, нормированная на единицу площади, в АО с 1998 по 2015 гг. снизилась на 12.9% [26]. Ранее в многочисленных работах было отмечено, что рост $ПП_{\text{tot}}$ в морях АО скорее экстенсивный, нежели интенсивный, то есть происходящий, главным образом, за счет увеличения площадей, свободных ото льда [6, 11, 12, 26, 31]. Этот вывод подтверждается строгой положительной связью между $ПП_{\text{tot}}$ и площадью, свободной ото льда [6, 7].

Парадоксальным на первый взгляд выглядит незначительное сокращение площади ледового покрова ВСМ при положительном тренде T_0 . Ранее было отмечено, что в региональном масштабе увеличение температуры может не приводить к уменьшению ледовитости из-за системы течений на шельфе морей Сибирской Арктики, которая препятствует сезонному освобождению акватории ото льда [1].

Сравнение с результатами предыдущих исследований. В ВСМ в 2002–2018 гг. площадь, свободная ото льда практически не изменялась, слабый отрицательный тренд был статистически незначим (табл. 1). Также слабо и статистически незначимо снижались величины $ПП_{\text{tot}}$ (рис. 5). Таким образом, наши результаты контрастируют с данными, полученными для ВСМ в 1998–2006 гг. [31], в 1998–2012 гг. [12], в 2003–2012 гг. [2] и в 2003–2013 гг. [29], согласно которым $ПП_{\text{tot}}$ ВСМ в исследованные периоды возрастала вместе с увеличением площадей, свободных ото льда.

Различия в знаках трендов могут объясняться разным временем осреднения результатов. Обобщения в приведенных выше работах заканчивались максимум в 2013 г. Массив данных, использованный в нашей работе, относился к более продолжительному временному интервалу (2002–2018 гг.). Известно, что изменения первичной продукции в АО после 2011 г. были незначительными [26]. Другой причиной расхождений с литературными данными может быть различие в площадях исследованных акваторий. Так, в некоторых работах исследования межгодовой изменчивости первичной продукции были проведены в так называемом “секторе Восточно-Сибирского моря”, включающем в себя акватории центрального арктического бассейна [12, 31]. В масштабах этого сектора увеличение $ПП_{\text{tot}}$ происходит в основном за счет так называемой шельфовой маргинальной ледовой зоны (Shelf Marginal Ice Zone). Непосредственно на шельфе ВСМ (≤ 220 м) по определению, данному в работе [45], межгодовые изме-

нения $ПП_{\text{tot}}$ выражены слабо [31]. Следовательно, этот вывод можно применить для ВСМ в его географических границах, принятых в настоящей работе. Известно, что северная граница ВСМ приблизительно соответствует границе континентального шельфа [8].

В связи с отмеченными выше причинами расхождений результатов, приведенных в настоящей статье, с данными предыдущих исследований, представляет интерес сравнение межгодовых изменений первичной продукции в совпадающие временные интервалы. Такое сравнение показывает, что описание изменений $ПП_{\text{tot}}$ в 2002–2012 гг. близко к характеру изменчивости, приведенному в работах [12, 29]. В работе [2] до 2007 г. изменений $ПП_{\text{tot}}$ практически не происходило. Далее отмечен рост этого показателя до 2010 г. и некоторое снижение к 2012 г. Главными отличиями от наших результатов нам видятся отсутствие максимумов $ПП_{\text{tot}}$ в 2002–2003 гг. и в 2007 г., которые прослеживаются и по данным других авторов [12, 29, 31]. Причинами расхождений в результатах различных исследований могут быть как отличия в выборе географических границ исследуемой акватории, так и различные подходы к моделированию первичной продукции, используемые авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, представленные в настоящей работе, свидетельствуют о незначительных вариациях ПП в ВСМ в последние две декады. Наши выводы несколько не совпадают с заключением, сделанным для всего АО. Согласно ему, заметное потепление АО, происходящее в последнее время, вызывает значительное сокращение площади ледового покрытия, удлинение вегетационного сезона и, как следствие, увеличение первичной продукции всей акватории. Таким образом, данные региональных исследований межгодовой динамики ПП и ледового покрова не всегда совпадают с выводами, полученными для АО в целом. Незначительное уменьшение $ПП_{\text{tot}}$ и увеличение $S_{\text{л}}$ в ВСМ в 2002–2018 гг. подтверждает это заключение. Ранее отличия региональной картины межгодовой динамики $ПП_{\text{tot}}$ и $S_{\text{л}}$ от изменчивости этих параметров во всем АО были отмечены в море Лаптевых [7]. Результаты, представленные в настоящей работе, свидетельствуют о том, что долгосрочную динамику $ПП_{\text{tot}}$ в Арктическом океане определяет не только изменчивость площади ледового покрова, но и величина удельной, рассчитанной на единицу площади, первичной продукции в столбе воды, которая зависит от комплекса разнообразных абиотических факторов.

Благодарности. Авторы благодарят GSFC DAAC (Goddard Space Flight Center, Distributed Active Archive Center) NASA за возможность использова-

ния спутниковой информации сканера MODIS-Aqua, NODC (National Oceanographic Data Center) NOAA за предоставленные гидрофизические данные, а также NSIDC (National Snow and Ice Data Center) NOAA за данные по площади ледового покрытия.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0149-2019-0008. Экспедиционные исследования и обработка спутниковых данных проведены при финансовой поддержке Гранта РФФИ № 18-05-60069 “Арктика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бородачев В.Е., Бородачев И.В.* Ледовитость моря Лаптевых в условиях колебания климата Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Т. 109. № 3. С. 60–73.
2. *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.
3. *Демидов А.Б., Гагарин В.И.* Первичная продукция и условия ее формирования в Восточно-Сибирском море в осенний период // Докл. РАН. 2019. Т. 487. № 6. С. 696–700. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524876696-700>
4. *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>
5. *Демидов А.Б., Гагарин В.И., Шеберстов С.В.* Сезонная изменчивость и оценка годовой первичной продукции Восточно-Сибирского моря. Сравнение с другими морями Сибирской Арктики // Океанология. 2020. Т. 60. № 5.
6. *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.
7. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И.* Межгодовая изменчивость первичной продукции моря Лаптевых // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 60–73.
8. *Добровольский А.Д., Залогин В.С.* Моря СССР. М.: Московский университет, 1982. 192 с.
9. *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.
10. *Шеберстов С.В.* Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
11. *Arrigo K.R., van Dijken G.L.* Secular trends in Arctic Ocean net primary production // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C09011. <https://doi.org/10.1029/2011JC007151>
12. *Arrigo K.R., van Dijken G.L.* Continued increases in Arctic Ocean primary production // Progr. in Oceanogr. 2015. V. 136. P. 60–70.
13. *Aitchison J., Brown J.A.C.* The lognormal distribution // Economic Journal. 1957. V. 67. P. 713–715.
14. *Barber D.G., Lukovich J.V., Keogak J. et al.* The changing climate of the Arctic // Arctic. 2008. V. 61. № 1. P. 7–26.
15. *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. № 6. P. 4087–4101.
16. *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>
17. *Carmack E., Barber D., Christensen J. et al.* Climate variability and physical forcing of the food webs and the carbon budget on panarctic shelves // Progr in Oceanogr. 2006. V. 71. P. 145–181.
18. *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.
19. *Comiso J.C.* The rapid decline of multiyear ice cover // J. Clim. 2012. V. 25. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D11-00113.1>
20. *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>
21. *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.
22. *Falkowski P.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // J. Plankton Res. 1981. V.3. № 2. P. 203–216.
23. *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. 2012. <https://doi.org/10.1117/1112.981264>
24. *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.
25. 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.
26. *Kahru M., Lee Z., Mitchell B.G., Nevison C.D.* Effects of sea ice cover on satellite-detected primary production in the Arctic Ocean // Biol. Lett. 2016. V. 12. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0223>
27. *Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M. et al.* Thinning and volume loss of Arctic sea ice: 2003–2008 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C07005. <https://doi.org/10.1029/2009JC005312>
28. *Leu E., Søreide J.E., Hessen D.O. et al.* Consequences of changing sea-ice cover for primary and secondary producers in the European Arctic shelf seas: Timing, quantity, and quality // Progr. Oceanogr. 2011. V. 90. P. 18–32.
29. *Lewis K.M., Mitchell B.G., van Dijken G.L., Arrigo K.R.* Regional chlorophyll *a* algorithms in the Arctic Ocean

- and their effect on satellite-derived primary production estimates // *Deep-Sea Res. II*. 2016. V. 130. P. 14–27.
30. 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.
 31. 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>
 32. 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.
 33. Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J. et al. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean // *Inter. J. Rem. Sens.* 2013. V. 34. P. 3903–3937.
 34. Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A. River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea // Siberian river run-off in the Kara Sea / Eds. Stein R. et al. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 9–25.
 35. 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.
 36. Steele M., Ermold W., Zhang J. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L02614. <https://doi.org/10.1029/2007GL031651>
 37. Stroeve J., Holland M., Meier W. et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L09501. <https://doi.org/10.1029/2007GL029703>
 38. Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A.P. et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // *Geophys. Res. Lett.* 2012a. V. 39. L16502. <https://doi.org/10.1029/2012GL052676>
 39. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M. et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // *Clim. Change*. 2012b. V. 110. P. 1005–1027.
 40. Timmermans M.-L., Ladd C. Sea surface temperature // Arctic Report Card: Update for 2018 <https://arctic.noaa.gov/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/779/Sea-Surface-Temperature>.
 41. Tremblay J.-É., Bélanger S., Barber D.G. et al. Climate forcing multiplies biological productivity in the coastal Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L18604. <https://doi.org/10.1029/2011GL048825>
 42. Tremblay J.-É., Michel C., Hobson K. et al. Bloom dynamics in early opening waters of the Arctic Ocean // *Limnol. Oceanogr.* 2006. V. 51. № 2. P. 900–912.
 43. Tremblay J.-E., Robert D., Varela D.E. et al. Current state and trends in Canadian Arctic marine ecosystems: I. Primary production // *Clim. Change*. 2012. V. 115. P. 161–178.
 44. Vancoppenolle M., Bopp L., Madec G. et al. Future Arctic Ocean primary productivity from CMIP5 simulations: Uncertain outcome, but consistent mechanisms // *Global Biogeochem. Cycle*. 2013. V. 27. P. 605–619. <https://doi.org/10.1002/gbc.20055>
 45. Walsh J.J. et al. A numerical model of seasonal primary production within the Chukchi/Beaufort seas // *Deep Sea Res. II*. 2005. V. 52. № 24–26. P. 3541–3576.
 46. Wassmann P., Duarte C.M., Agustí S., Sejr M.K. Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem // *Glob. Change Biol.* 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02311.x>
 47. Wassmann P., Slagstad D., Ellingsen I. Primary production and climatic variability in the European sector of the Arctic Ocean prior to 2007: preliminary results // *Pol. Biol.* 2010. V. 33. P. 1641–1650.
 48. Zhang J., Spitz Y.H., Steele M. et al. Modeling the impact of declining sea ice on the Arctic marine planktonic ecosystem // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C10015. <https://doi.org/10.1029/2009/JC005387>

Interannual Variability of Primary Production in the East Siberian Sea

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*

Interannual variability (2002–2018) of primary production, surface seawater temperature (T_0), photosynthetically active radiation (PAR) and ice cover area was studied in the East Siberian Sea (ESS) based on the data of the MODIS-Aqua ocean color scanner. For 17 years the annual total primary production (PP_{tot}) decreased by 1.7 TgC. The multi-year negative trend in PP_{tot} was 0.1 TgC y^{-1} ($1.38\% \text{ y}^{-1}$). Decrease in PP_{tot} was accompanied by decrease in area-specific primary production (IPP). For the investigated period the annual mean IPP decreased by $13 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. The multi-year negative trend in IPP was $0.76 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ($0.84\% \text{ y}^{-1}$). The decrease in PP_{tot} and IPP was accompanied by statistically insignificant increase in T_0 ($R^2 = 0.09$) and statistically significant decline in PAR ($R^2 = 0.29$). During 17 years T_0 in ESS increased by 0.68°C ($0.04^\circ\text{C y}^{-1}$ or $3.2\% \text{ y}^{-1}$) and PAR declined by $3.4 \text{ Ein m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($0.2 \text{ Ein m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ y}^{-1}$ or $1.9\% \text{ y}^{-1}$). For the studied period the ice-free area slightly diminished ($R^2 = 0.10$) by $64.94 \times 10^3 \text{ km}^2$. The statistically insignificant multi-year trend in ESS ice-free area was $3.82 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ y}^{-1}$ ($0.87\% \text{ y}^{-1}$). Long-term variability in ESS PP_{tot} from 2002 to 2018 was linked not only with decrease in the ice cover but also with PAR level and IPP.

Keywords: annual primary production, interannual variability, East Siberian Sea