

УДК 581.132:574.583

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2020 г. А. Б. Демидов<sup>1</sup>, \*, С. В. Шеберстов<sup>1</sup>, В. И. Гагарин<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: demspa@rambler.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 12.12.2019 г.

Исследование межгодовой (2002–2018 гг.) изменчивости первичной продукции, температуры воды, фотосинтетически активной радиации и площади ледового покрова проведено в море Лаптевых по данным сканера цвета океана MODIS-Aqua. За 17-летний период выявлены статистически значимые положительный тренд температуры воды ( $R^2 = 0.27$ ) и отрицательный тренд фотосинтетически активной радиации ( $R^2 = 0.24$ ). Среднегодовая температура воды в регионе увеличилась на  $1.38^\circ\text{C}$ , а фотосинтетически активная радиация уменьшилась на  $3.4 \text{ Ein/m}^2$  в день. Площадь, свободная ото льда, за это время увеличивалась незначительно (0.15% в год). Общая первичная продукция моря Лаптевых сократилась на  $1.87 \text{ TgC}$ , или на 1.4% в год. Это сокращение сопровождалось уменьшением первичной продукции, нормированной на единицу площади, удельной первичной продукции. За исследованный период уменьшение величины этого показателя составило  $37.4 \text{ mgC/m}^2$  в день, 1.6% в год. Изменения уровня первичной продуктивности моря Лаптевых за последние 17 лет связаны, главным образом, не с динамикой ледового покрова, а с сокращением поступления фотосинтетически активной радиации и уменьшением удельной первичной продукции.

**Ключевые слова:** первичная продукция, межгодовая изменчивость, дистанционное зондирование, MODIS-Aqua, море Лаптевых

DOI: 10.31857/S0030157420010074

### ВВЕДЕНИЕ

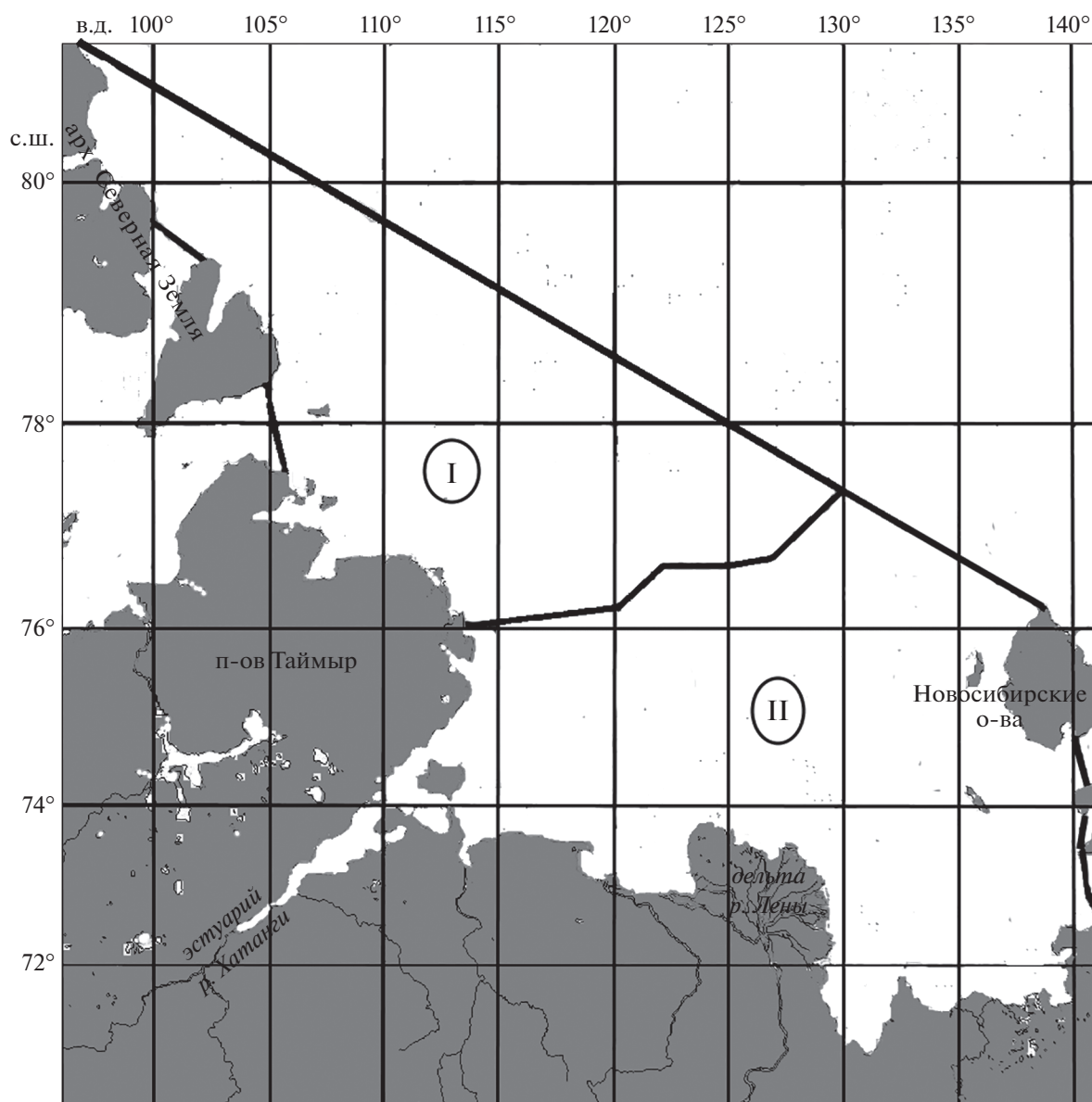
В настоящее время принято считать, что первичная продукция Арктического океана ( $\text{ПП}_{\text{тот}}$ ) возрастает за счет сокращения площади и толщины ледового покрова, раннего таяния и позднего ледостава и удлинения вегетационного сезона [15, 23–26, 34–37, 42–44]. Признается, что это увеличение происходит с разной скоростью в различных секторах Арктики [17]. Отмечено также, что в масштабе отдельно взятого арктического моря возрастание  $\text{ПП}_{\text{тот}}$  протекает с разной интенсивностью в разных его регионах [7].

Можно предположить, что знак тренда межгодовых изменений  $\text{ПП}_{\text{тот}}$  может зависеть от длительности временного интервала, в который проводится исследование, продукционной модели, а также от выбранных границ региона. Поэтому, представляется интересным провести исследование долгосрочных изменений первичной продукции и влияющих на нее факторов среды с использованием региональных продукционных моделей в масштабе отдельно взятого моря в его географических границах. Ранее подобный подход был применен при изучении межгодовой из-

менчивости первичной продукции Карского моря [7].

Долговременные изменения  $\text{ПП}_{\text{тот}}$  моря Лаптевых ранее были исследованы для периодов с 1998 по 2012 гг. [17], с 2003 по 2012 гг. [3] и с 2003 по 2013 гг. [37]. Концентрация хлорофилла “a” на поверхности (Хл), которая использовалась в этих работах, рассчитывалась по данным сканеров цвета океана Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) и Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS-Aqua) с использованием, соответственно, OC4v6 и OC3Mv6 алгоритмов [38, 39]. При этом была использована единая для Арктического океана продукционная модель [14, 40] либо применялись эмпирические зависимости между концентрацией Хл и первичной продукцией в столбе воды (ИПП) [3, 4]. В настоящее время исследования долгосрочных изменений  $\text{ПП}_{\text{тот}}$  моря Лаптевых можно провести с использованием региональных моделей Хл и ИПП [9, 28], опираясь на более длительный, чем в предыдущих работах, временной ряд.

Таким образом, целями настоящей статьи являлись: (1) — описание межгодовых изменений



**Рис. 1.** Районы моря Лаптевых, в которых были исследованы межгодовые изменения первичной продукции и абиотических параметров: I – Северо-западный; II – Юго-восточный.

ПП<sub>тот</sub> и сопутствующих факторов среды в различных районах моря Лаптевых с 2002 по 2018 гг. и (2) – оценка влияния на эту изменчивость абиотических факторов, таких как площади ледового покрова, температуры воды на поверхности и фотосинтетически активной радиации (ФАР).

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

**Районирование моря Лаптевых.** Исследования межгодовой изменчивости первичной продукции и абиотических факторов были проведены для всего моря и его двух районов, отличающихся уровнем продуктивности (рис. 1). Нами были вы-

делены Северо-западный и Юго-восточный районы. Границей между этими районами был принят северный предел распространения речных вод и вод полыньи моря Лаптевых [20]. Эта граница близка к летнему положению изогалины 25 psu [8, 19, 31], которую принято считать разделом между распресненными и морскими водами [13].

**Экспедиционные данные.** Разработка и верификация региональных моделей ИПП и Хл была выполнена на основе базы натуральных наблюдений, проведенных в конце августа–начале октября [2, 9–11, 27]. Так как этот массив данных был собран в Карском море, нами было проведено тестирование разработанной продукционной моде-

ли по результатам измерений, полученным в море Лаптевых [5]. Такая работа была сделана с целью проверки эффективности модели ИПП на акватории, сходной с Карским морем по гидрологическим и гидрохимическим показателям. Было показано, что разработанная нами модель работает приблизительно с одинаковой эффективностью, как в Карском море, так и в море Лаптевых [6].

**Спутниковые данные.** Данные сканера цвета 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/](http://www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/) в границах моря Лаптевых, которые были приняты в одной из предыдущих работ по оценке первичной продукции Арктического океана [32]. Эти данные были обработаны с помощью программного обеспечения, разработанного в ИО РАН [12]. Значения коэффициента спектральной яркости моря  $R_{rs}(\lambda_i)$  были пересчитаны в величины концентрации  $X_l$  по региональному алгоритму [9].

Данные по фотосинтетически активной радиации использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua [30]. Как было отмечено в этой работе, модельные величины ФАР превышали измеренные. Анализ данных для 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  $0.25 \times 0.25^\circ$  и усредненные за 1 день были получены 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 [41].

Площадь акватории покрытой льдом рассчитывалась с помощью программного обеспечения [12] по первичным данным, полученным с сайта [ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202\\_v2/north/daily](ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202_v2/north/daily) [25]. При расчете первичной продукции фитопланктона свободной ото льда считалась акватория, если площадь ледового покрытия была  $< 15\%$  [22].

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 свободные ото льда акватории,

которые могли бы быть открыты для сканера цвета в отсутствие облачности.

**Региональные модели первичной продукции и хлорофилла и расчет трендов межгодовых изменений.** Формула расчета ИПП имеет вид

$$\text{ИПП} = \psi k X_{l0} I_0,$$

где  $\psi$  — среднее для всей акватории величина эффективности утилизации солнечной энергии [29]:

$$\psi = \text{ДАЧ}_c / I_0,$$

где  $\text{ДАЧ}_c$  — среднее в слое фотосинтеза дневное ассимиляционное число ( $\text{мгС/мг хл "a"}$ ), а  $I_0$  — величина дневной подповерхностной ФАР ( $\text{Ein/m}^2$ ), а  $k$  — средний для всего моря индекс вертикального распределения  $X_l$ :

$$k = X_{l_{\text{fc}}} / X_{l0},$$

где  $X_{l_{\text{fc}}}$  — интегральное значение хлорофилла в слое фотосинтеза, а  $X_{l0}$  — его концентрация на поверхности. Распределение произведения  $\psi k$  имеет логнормальный вид [28], поэтому целесообразно использовать его среднюю геометрическую величину [18]. Для всей акватории моря Лаптевых она равняется 7.95. Таким образом, итоговое уравнение модели имеет вид

$$\text{ИПП} = 7.95 X_{l0} I_0,$$

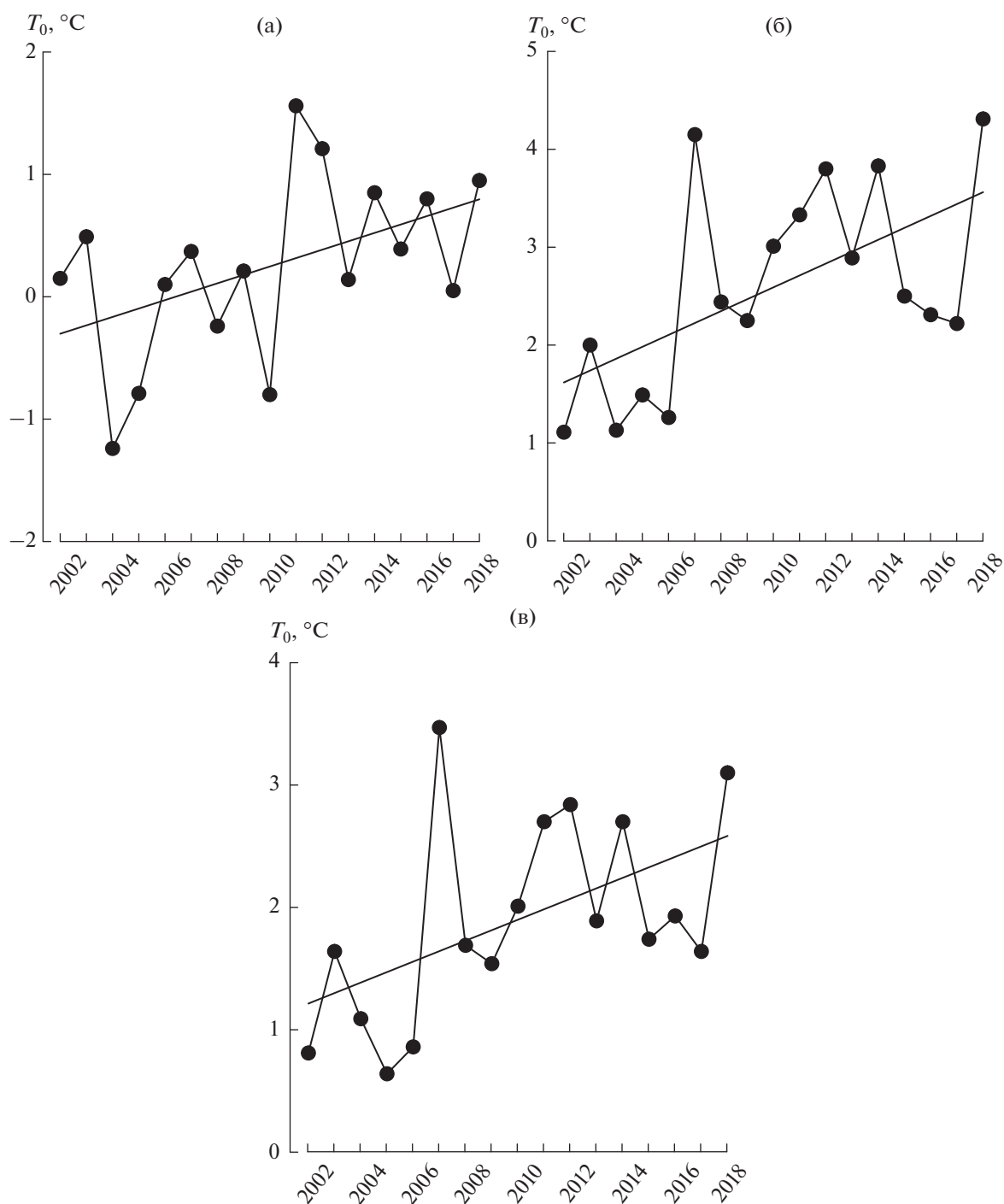
Известно, что стандартный алгоритм MODIS завышает величины концентрации  $X_{l0}$  в водах второго оптического типа [33]. Для того, чтобы избежать больших ошибок в определении ИПП, мы использовали региональный алгоритм расчета  $X_{l0}$  [9], где наилучшая корреляция измеренных и расчетных величин  $X_l$  ( $R^2 = 0.47$ ;  $N = 185$ ) была получена при использовании отношения  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$ :

$$\ln(X_{l0}) = -3.66 \ln(R_{rs}(531)/R_{rs}(547)) + 0.116.$$

Графики долговременных изменений параметров среды и первичной продукции, как правило, имеют сложный вид и могут быть аппроксимированы с помощью разных функций. Для их описания нами были выбрано уравнение линейного тренда  $y = a + bx$ , где  $y$  — зависимая переменная,  $x$  — независимая переменная,  $a$  и  $b$  соответственно, свободный член и коэффициент линейной регрессии. Таким образом выявляется тенденция в изменении того или иного показателя и производится сравнение полученных данных с результатами предыдущих исследований. Аномалии первичной продукции и абиотических факторов рассчитывались в процентах от средней величины за 2002–2018 гг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение последних 17-ти лет (2002–2018 гг.) в море Лаптевых отмечен достоверный ( $p < 0.05$ )



**Рис. 2.** Межгодовые изменения и линейные тренды температуры воды на поверхности ( $T_0$ ) в различных районах моря Лаптевых в период с 2002 по 2018 гг. (а) – Северо-западный район; (б) – Юго-восточный район; (в) – море Лаптевых.

положительный тренд температуры воды на поверхности ( $T_0$ ) ( $R^2 = 0.27$ ) (рис. 2; табл. 1). За исследованный период для всего моря  $T_0$  увеличилась на  $1.38^\circ\text{C}$ . Температура воды возрастала в среднем на  $0.08^\circ\text{C}$  или на  $3.1\%$  в год. Достоверный ( $R^2 = 0.35$ ,  $p < 0.05$ ) положительный тренд  $T_0$  зарегистрирован в Юго-восточном районе моря.

Здесь общее возрастание  $T_0$  составило  $1.98^\circ\text{C}$  за 17 лет. Температура воды росла на  $0.12^\circ\text{C}$  ( $3.3\%$ ) в год. В Северо-западном районе рост температуры воды на поверхности составил  $1.1^\circ\text{C}$  или  $0.06^\circ\text{C}$  в год.

В противоположность  $T_0$  среднегодовые значения ФАР в море Лаптевых уменьшались (рис. 3).

**Таблица 1.** Параметры линейного тренда межгодовых (2002–2018 гг.) изменений первичной продукции и факторов среды в различных районах моря Лаптевых

Район	Статистический показатель	ИПП	ПП <sub>тот</sub>	ФАР	<i>T</i>	<i>S</i> <sub>л</sub>	<i>S</i> <sub>с</sub>
Северо-западный	$\bar{M}$	<b>79</b>	1.28	6.01	0.25	132	76
	Тренд	<b>-3.1</b>	-0.025	-0.2	0.06	-1.1	1.1
	Тренд, %	<b>-2.9</b>	-1.6	-2.9	8.1	-0.8	1.3
	<i>R</i> <sup>2</sup>	<b>0.28</b>	0.05	0.22	0.22	0.06	0.06
	<i>p</i>	<b>0.029</b>	0.399	0.058	0.055	0.328	0.325
Юго-восточный	$\bar{M}$	138	5.67	8.29	<b>2.59</b>	174	189
	Тренд	-1.6	-0.085	-0.1	<b>0.12</b>	0.7	-0.7
	Тренд, %	-1.0	-1.3	-1.2	<b>3.3</b>	0.36	-0.36
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.10	0.06	0.13	<b>0.35</b>	0.02	0.02
	<i>p</i>	0.213	0.325	0.154	<b>0.012</b>	0.619	0.619
Все море	$\bar{M}$	121	6.93	<b>7.59</b>	<b>1.9</b>	305	267
	Тренд	-2.2	-0.11	<b>-0.2</b>	<b>0.08</b>	-0.4	0.4
	Тренд, %	-1.6	-1.4	<b>-1.8</b>	<b>3.1</b>	-0.11	0.15
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.22	0.08	<b>0.24</b>	<b>0.27</b>	0.002	0.002
	<i>p</i>	0.057	0.275	<b>0.048</b>	<b>0.031</b>	0.865	0.851

Примечание.  $\bar{M}$  – средняя многолетняя (2002 – 2018 гг.) величина; тренд представлен в абсолютных и относительных (%) значениях в год; *R*<sup>2</sup> – коэффициент детерминации; *p* – уровень значимости. Выделены значения, характеризующие статистически значимые тренды при *p* < 0.05; *N* = 17. Параметры: первичная продукция в столбе воды (ИПП, мгС/м<sup>2</sup> в день), годовая первичная продукция (ПП<sub>тот</sub>, ТгС), фотосинтетически активная радиация (ФАР, Ейн/м<sup>2</sup> в день), температура воды на поверхности (*T*<sub>0</sub>, °С), площадь ледового покрытия (*S*<sub>л</sub>, × 10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>) и площадь, свободная ото льда (*S*<sub>с</sub>, × 10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>).

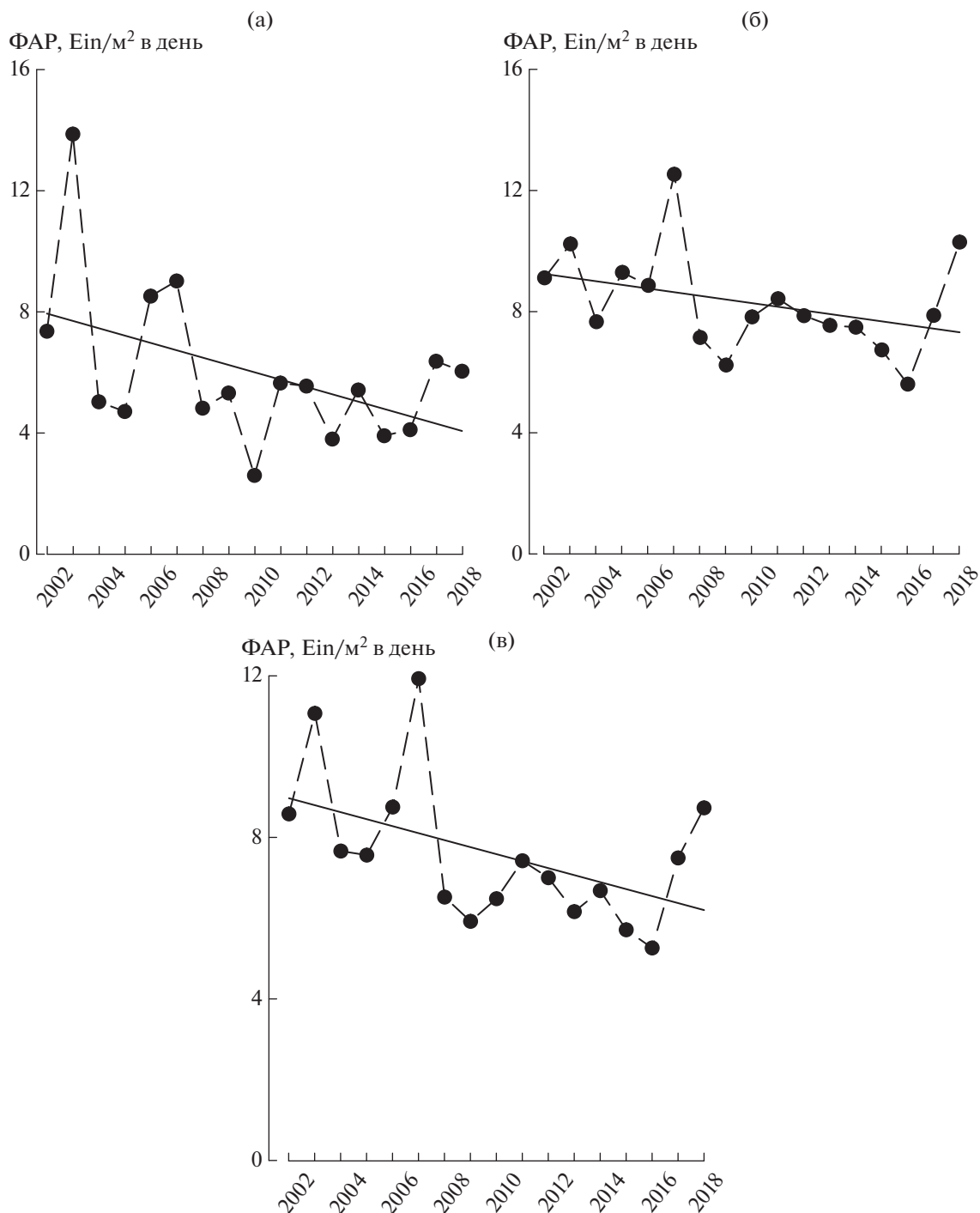
Статистически достоверный отрицательный тренд ФАР (*R*<sup>2</sup> = 0.24, *p* < 0.05) отмечен в целом для моря. Величины этого показателя каждый год уменьшались в среднем на 0.2 Ейн/м<sup>2</sup> в год или на 1.8%. Так же как и на всей акватории моря, в Северо-западном районе сокращение ФАР происходило со скоростью 0.2 Ейн/м<sup>2</sup> (2.9%) в год. Менее выраженным межгодовой тренд оказался в Юго-восточном районе: 0.1 Ейн/м<sup>2</sup> (1.2%) в год (табл. 1). С 2002 по 2018 гг. среднегодовая величина ФАР в море Лаптевых уменьшилась на 3.4 Ейн/м<sup>2</sup> в день.

Среднегодовая площадь ледового покрова (*S*<sub>л</sub>) имела тенденцию к незначительному сокращению в Северо-западном районе и в целом в море Лаптевых (рис. 4; табл. 1). Уменьшение площади ледового покрова на этих акваториях составило соответственно 0.8 и 0.11% в год. В Юго-восточном районе, напротив, происходило некоторое увеличение среднегодовой площади ледового покрытия (0.36% в год). Соответственно, обратная тенденция отмечена для площадей, свободных ото льда (*S*<sub>с</sub>) (рис. 4). В целом для моря Лаптевых за 17 лет среднегодовая площадь ледового покрытия сократилась на 1.9% (6.8 × 10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>).

Описанная выше межгодовая изменчивость абиотических параметров отразилась на незначи-

тельной в среднем вариабельности ПП<sub>тот</sub> в море Лаптевых с 2002 по 2018 гг. (рис. 5). В исследованный период ПП<sub>тот</sub> слабо и статистически незначимо уменьшалась во всех районах и в целом на акватории моря. Это уменьшение составило от 0.02 до 0.11 ТгС в год или 1.3–1.6% в год (табл. 1). Всего за 17 лет ПП<sub>тот</sub> моря Лаптевых уменьшилась на 1.87 ТгС. В Северо-западном районе величина ПП<sub>тот</sub> сократилась на 0.43 ТгС, а в Юго-восточном – на 1.44 ТгС.

Так же как и для ПП<sub>тот</sub>, отрицательный тренд был отмечен в межгодовых изменениях ИПП, нормированной на единицу площади, удельной первичной продукции (мгС/м<sup>2</sup> в день) (рис. 6). Достоверный (*R*<sup>2</sup> = 0.28, *p* < 0.05) тренд этого показателя зарегистрирован в Северо-западном районе. Здесь в среднем за год ИПП уменьшалась на 3.1 мгС/м<sup>2</sup> в день или на 2.9%. В Юго-восточном районе происходило менее выраженное уменьшение ИПП. В этом районе значения этого параметра в среднем за год снижались на 1.6 мгС/м<sup>2</sup> в день (1% в год). Для всего моря Лаптевых среднегодовое уменьшение ИПП составило 2.2 мгС/м<sup>2</sup> в день или 1.6% в год. Общее уменьшение ИПП для всей акватории моря составило 37.4 мгС/м<sup>2</sup> в день. Для Северо-западного района оно равня-

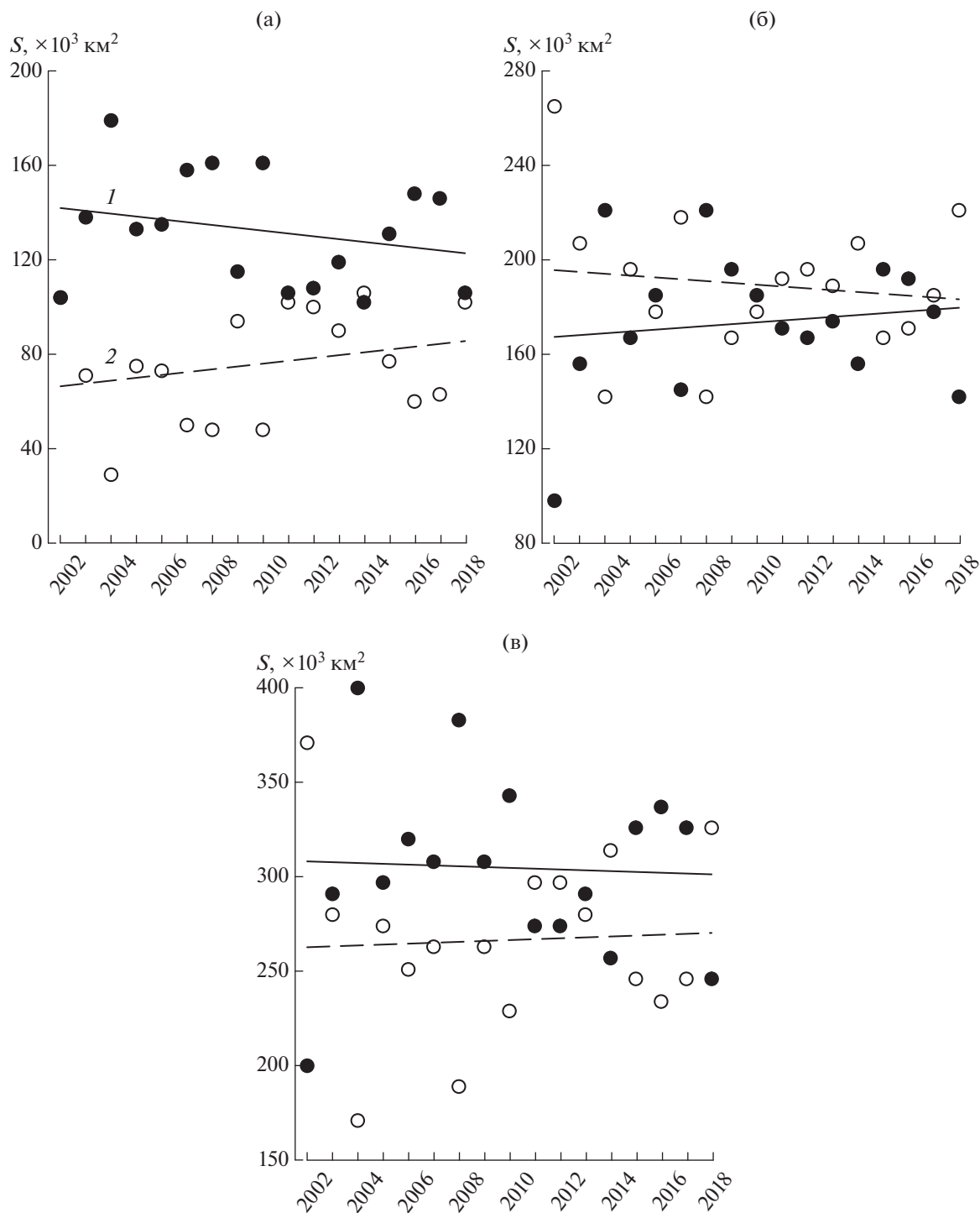


**Рис. 3.** Межгодовые изменения и линейные тренды фотосинтетически активной радиации (ФАР) в различных районах моря Лаптевых в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

лось  $52.7 \text{ мгС/м}^2$  в день, а для Юго-восточного района –  $27.2 \text{ мгС/м}^2$  в день.

В табл. 2 представлены результаты расчета аномалий поверхностной температуры, ФАР, площади, свободной ото льда и первичной продукции с 2002 по 2018 гг. В море Лаптевых можно

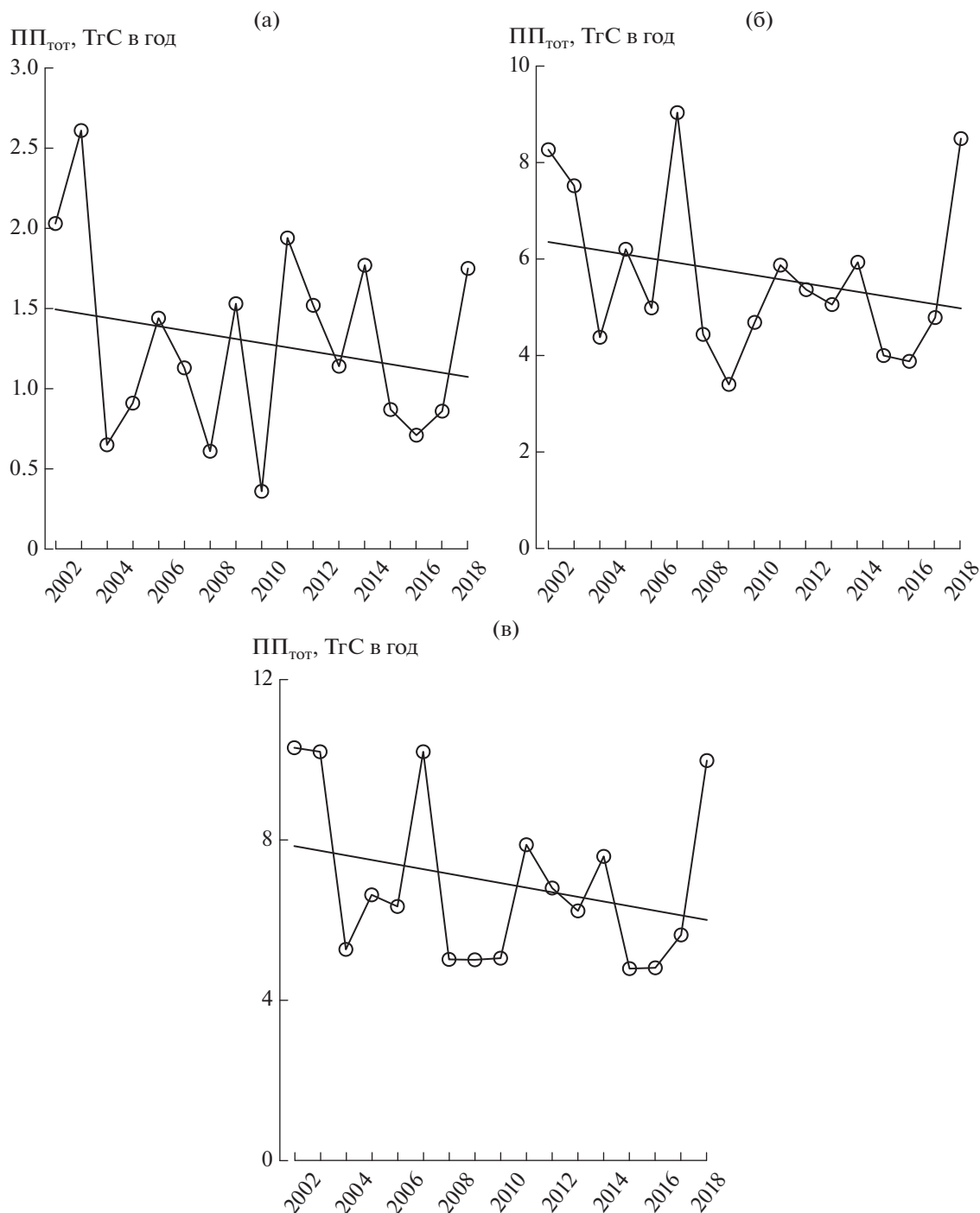
условно выделить “холодный” (2002–2009 гг.) и “теплый” (2010–2018 гг.) периоды соответственно с отрицательными и положительными значениями аномалий  $T_0$ . В “холодный” период исключение составил 2007 г., когда во всем Арктическом бассейне были зарегистрированы положительные аномалии температуры. В “теп-



**Рис. 4.** Межгодовые изменения площади ледового покрытия (1) и площади, свободной от льда (2) в различных районах моря Лаптевых в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

лый” период можно отметить 2013, 2015 и 2017 гг. с незначительными отрицательными температурными аномалиями. Средние аномалии  $T_0$  в “холодный” и “теплый” периоды составили  $-23$  и  $20\%$  соответственно. Средние аномалии площади, свободной от льда, в “холодный” и “теплый”

периоды были незначительными, но соответствовали температурным аномалиям ( $-3$  и  $3\%$  соответственно). Средняя аномалия ФАР в “холодный” период была положительной ( $12\%$ ), а в “теплый” период – отрицательной ( $-11\%$ ). Зарегистрированы положительные средние аномалии



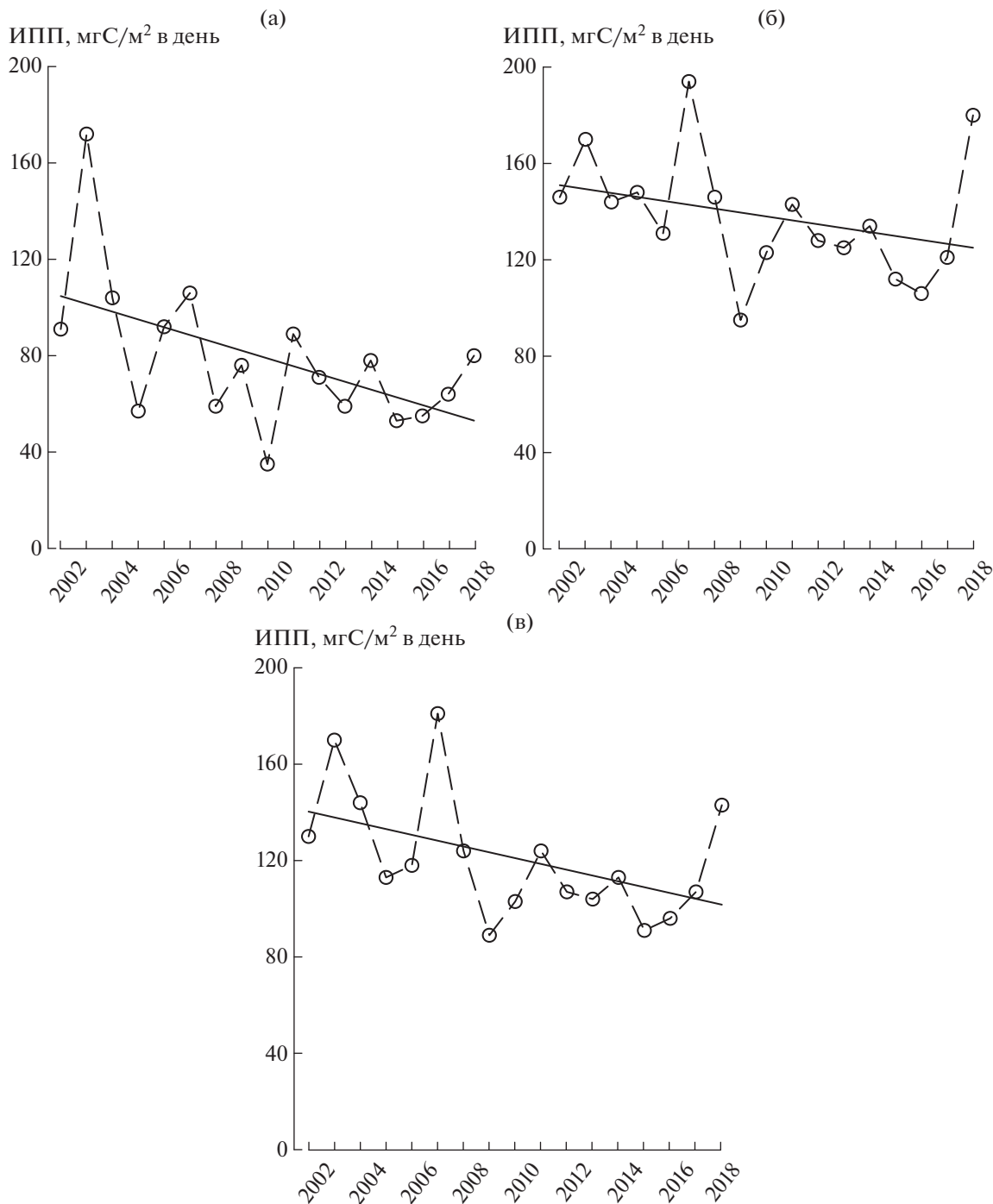
**Рис. 5.** Межгодовые изменения и линейные тренды первичной продукции ( $PP_{\text{тот}}$ ), в различных районах моря Лаптевых в период с 2002 по 2018 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

ИПП и  $PP_{\text{тот}}$  в “холодный” период (10 и 6% соответственно) и, напротив, отрицательные в “теплый” период (–9 и –6% соответственно).

Рассчитанная на площадь всего моря годовая первичная продукция достоверно зависела от площади свободной ото льда во всех районах и в

целом в море Лаптевых при высоких коэффициентах детерминации ( $R^2$  от 0.49 до 0.69,  $p < 0.05$ ) (табл. 3). Также достоверная корреляция отмечена для связи  $PP_{\text{тот}}$  с ФАР ( $R^2$  от 0.49 до 0.81,  $p < 0.05$ ). В отличие от этих двух параметров, достоверная связь  $PP_{\text{тот}}$  с  $T_0$  была зарегистрирована





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

только в Северо-западном районе ( $R^2 = 0.36$ ,  $p < 0.05$ ). В Юго-восточном районе и в целом в море Лаптевых эта связь была слабой и статистически незначимой (табл. 3). Так же как и  $ПП_{\text{tot}}$ , значения ИПП были тесно связаны с ФАР ( $R^2$  от 0.83 до 0.85,  $p < 0.05$ ) и практически не зависели от температуры воды на поверхности (табл. 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

**Межгодовая изменчивость первичной продукции и абиотических факторов.** В настоящей работе показано, что  $ПП_{\text{tot}}$  моря Лаптевых уменьшалась на 1.4% в год с 2002 по 2018 гг. Это уменьшение происходило на фоне статистически достоверных положительных тренда температуры воды на по-

**Таблица 2.** Аномалии (%) первичной продукции и абиотических характеристик в море Лаптевых в 2002–2018 гг.

Годы	Период	$T_0$	ФАР	$S_c$	ИПП	ПП <sub>тот</sub>
2002	“Холодный”	-57	13	39	7	49
2003		-14	46	5	40	47
2004		-43	1	-36	19	-24
2005		-66	0	3	-7	-4
2006		-55	15	-6	-2	-9
2007		83	57	-1	50	47
2008		-11	-14	-29	2	-28
2009		-19	-22	-1	-26	-28
2010		“Теплый”	6	-14	-14	-15
2011	42		-2	11	2	14
2012	49		-8	11	-12	-2
2013	-1		-19	5	-14	-10
2014	42		-12	18	-7	10
2015	-8		-25	-8	-25	-31
2016	2		-31	-12	-21	-31
2017	-14		-1	-8	-12	-19
2018	63		15	22	18	44

Параметры:  $T_0$  – температура воды на поверхности, ФАР – фотосинтетически активная радиация,  $S_c$  – площадь, свободная ото льда, ИПП – первичная продукция в столбе воды, ПП<sub>тот</sub> – годовая первичная продукция.

**Таблица 3.** Статистические показатели линейных ( $y = a + bx$ ) зависимостей годовой первичной продукции (ПП<sub>тот</sub>, ТгС) от среднегодовых величин площади, свободной ото льда ( $S_c$ ,  $\times 10^3$  км<sup>2</sup>) и температуры воды на поверхности ( $T_0$ , °С) в различных районах моря Лаптевых

Переменные	Статистический показатель	Северо-западный район	Юго-восточный район	Все море
$y - \text{ПП}_{\text{тот}}, x - S_c$	<i>a</i>	<b>-0.05</b>	<b>-3.39</b>	<b>-1.16</b>
	<i>b</i>	<b>0.02</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>
	$R^2$	<b>0.49</b>	<b>0.69</b>	<b>0.50</b>
$y - \text{ПП}_{\text{тот}}, x - T_0$	<i>a</i>	<b>1.16</b>	4.34	5.31
	<i>b</i>	<b>0.49</b>	0.51	0.85
	$R^2$	<b>0.36</b>	0.10	0.12
$y - \text{ПП}_{\text{тот}}, x - \text{ФАР}$	<i>a</i>	<b>0.30</b>	<b>-1.94</b>	<b>-0.14</b>
	<i>b</i>	<b>0.16</b>	<b>0.92</b>	<b>0.93</b>
	$R^2$	<b>0.49</b>	<b>0.81</b>	<b>0.65</b>

Примечание. *a* и *b* – соответственно свободный член и коэффициент линейной регрессии;  $R^2$  – коэффициент детерминации. Выделены статистически значимые параметры при  $p < 0.05$ ;  $N = 17$ .

верхности и отрицательного тренда фотосинтетически активной радиации (табл. 1).

Достоверная зависимость ПП<sub>тот</sub> от  $T_0$  отмечена только в Северо-западном районе моря. В целом, как ПП<sub>тот</sub>, так и ИПП напрямую не зависели от температуры воды на поверхности. Общая тенденция связи первичной продукции и  $T_0$  в море Лаптевых заключалась в увеличении ИПП и

ПП<sub>тот</sub> в “холодный” и в их уменьшении в “теплый” периоды (табл. 2). В предыдущей работе по исследованию долговременной изменчивости первичной продукции Карского моря были отмечена достоверная корреляция ПП<sub>тот</sub> и  $T_0$  только в эстуариях Оби и Енисея [7]. Связь этих показателей не всегда прослеживается в явном виде. Влияние температуры на временную динамику первичной продукции осуществляется опосредованно

**Таблица 4.** Статистические показатели линейных ( $y = a + bx$ ) зависимостей первичной продукции в столбе воды (ИПП, мгС/м<sup>2</sup> в день) от среднегодовых величин температуры воды на поверхности ( $T_0$ , °С) и фотосинтетически активной радиации (ФАР, Ein/м<sup>2</sup> в день) в различных районах моря Лаптевых

Переменные	Статистический показатель	Северо-западный район	Юго-восточный район	Все море
$y$ – ИПП, $x$ – $T_0$	$a$	77.22	119.06	105
	$b$	6.74	7.31	8.44
	$R^2$	0.03	0.08	0.07
$y$ – ИПП, $x$ – ФАР	$a$	<b>13.74</b>	<b>22.27</b>	<b>20.34</b>
	$b$	<b>10.85</b>	<b>13.95</b>	<b>13.26</b>
	$R^2$	<b>0.85</b>	<b>0.83</b>	<b>0.85</b>

Примечание.  $a$  и  $b$  – соответственно свободный член и коэффициент линейной регрессии;  $R^2$  – коэффициент детерминации. Выделены статистически достоверные параметры при  $p < 0.05$ ;  $N = 17$ .

через сокращение площади ледового покрытия и изменение глубины верхнего перемешанного слоя, которая характеризует уровень снабжения эвфотической зоны биогенными элементами [45].

Несмотря на хорошо выраженную корреляционную зависимость  $ПП_{\text{tot}}$  от площади, свободной ото льда (табл. 3), тренды межгодовых изменений этих показателей находятся в противофазе (рис. 4 и 5). По всей видимости, такое несоответствие происходит благодаря уменьшению в исследованный период ИПП и ФАР (рис. 3 и 6).

Ранее было показано, что в период роста среднегодовых значений температуры и сокращения площади ледового покрова, увеличение облачности и, как следствие, сокращение ФАР в Арктическом океане может тормозить рост первичной продукции [21]. Уменьшение ФАР в этом регионе отмечено также в 1998–2006 гг. [40]. Данные, представленные в табл. 3 и 4 свидетельствуют о строгой зависимости ИПП и  $ПП_{\text{tot}}$  от ФАР. Следует отметить, что такая зависимость частично объясняется особенностью применяемого в настоящей работе продукционного алгоритма, в формулу расчета которого ФАР входит непосредственно.

О влиянии удельной интенсивности фотосинтеза на рост  $ПП_{\text{tot}}$  Арктического океана нет единого мнения. По данным 1998–2006 гг. было сделано предположение о увеличении ИПП Арктического океана вместе с  $ПП_{\text{tot}}$  [40]. Другие авторы не отмечали подобного эффекта [16, 46]. По последним данным интенсивность фотосинтеза, нормированная на единицу площади, в Арктическом океане с 1998 по 2015 гг. снизилась на 12.9% [34]. Проведенное ранее исследование межгодовой изменчивости ИПП Карского моря, показало, что интенсивность фотосинтеза в период с 2002 по 2016 гг. в различных районах моря изменялась статистически незначимо ( $R^2 = 0.00–0.17$ ). Изменчивость суммарной годовой первичной

продукции зависела от интенсивности фотосинтеза в разных районах на 9–60%. Для всего Карского моря эта величина составила 34%. Интересно отметить тот факт, что самые значительные отрицательные тренды ИПП были отмечены в Карском море [7] и море Лаптевых (рис. 6) в их северных районах. Пока этот факт мы можем лишь констатировать. Последующие работы призваны дать ему объяснение.

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

**Сравнение с результатами предыдущих исследований.** В предыдущих работах установлено, что межгодовая изменчивость  $ПП_{\text{tot}}$  строго зависит от динамики площади, свободной ото льда [7, 17, 34, 40]. В море Лаптевых в 2002–2018 гг.  $S_c$  практически не изменялась, слабый положительный тренд был статистически незначим (табл. 1), а  $ПП_{\text{tot}}$  уменьшалась в выделенных нами районах и в целом на всей акватории (рис. 5). Таким образом, наши результаты контрастируют с данным, полученным для моря Лаптевых в 1998–2006 гг. [40], в 1998–2012 гг. [17], в 2003–2012 гг. [3] и в 2003–2013 гг. [37]. Различия в знаках трендов объясняются, с одной стороны, разным временем осреднения результатов. Обобщения в приведенных выше работах заканчивались максимум в 2013 г. Массив данных, использованный в нашей работе, относится к более продолжительному временному интервалу (2002–2018 гг.). Известно, что изменения первичной продукции в Арктическом океане после 2011 г. были незначительными [34]. Другой причиной расхождений с литературными данными может быть различие в площадях иссле-

дованных акваторий. Так, в некоторых работах исследования межгодовой изменчивости первичной продукции были проведены в так называемом “секторе моря Лаптевых”, включающем в себя акватории центрального арктического бассейна и Восточно-Сибирского моря [17, 40].

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 в разных работах временные интервалы. Обращают на себя внимания расхождения в картине межгодовой динамики  $ПП_{\text{tot}}$  с данными Ветрова и Романкевича [3]. Так, в цитируемой работе 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 с нашими результатами нам видятся отсутствие максимумов  $ПП_{\text{tot}}$  в 2002–2003 гг. и в 2007 г., которые прослеживаются и по данным других авторов [17, 37, 40]. Дальнейшее сравнение показывает, что наше описание изменений  $ПП_{\text{tot}}$  в 2002–2012 гг. близко к представленному в работах [17, 37]. Основной причиной расхождений результатов мы видим в различных подходах к моделированию первичной продукции, используемых авторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заметное потепление Арктического океана, происходящее в последние две декады, вызывает значительное сокращение площади ледового покрытия, удлинение вегетационного сезона и, как следствие, увеличение общей, рассчитанной на площадь всей акватории, первичной продукции. Данные региональных исследований межгодовой динамики первичной продукции не всегда совпадают с выводами, полученными для Арктического океана в целом и уменьшение  $ПП_{\text{tot}}$  в море Лаптевых в 2002–2018 гг. подтверждает это заключение. Результаты, представленные в настоящей работе, свидетельствуют о том, что долговременную динамику  $ПП_{\text{tot}}$  в Арктике 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 использования 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.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0149-2019-0008. Экспедиционные исследования и обработка спутниковых данных проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ “Арктика” № 18-05-60069.

## 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. *Ведерников В.И., Демидов А.Б., Судьбин А.И.* Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 693–703.
3. *Ветров А.А., Романкевич Е.А.* Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в арктических морях Евразии в 2003–2012 гг. // Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 1. С. 97–99.
4. *Виноградов М.Е., Ведерников В.И., Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Компоненты цикла углерода в Арктических морях России. Первичная продукция и поток  $C_{\text{орг}}$  из фотического слоя // Океанология. 2000. Т. 40 № 2. С. 221–233.
5. *Демидов А.Б., Гагарин В.И., Арашкевич Е.Г. и др.* Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в море Лаптевых в августе–сентябре // Океанология. 2019. Т. 59. № 5.
6. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Вазюля С.В. и др.* Верификация моделей первичной продукции Карского моря по экспедиционным и спутниковым данным // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 879–889.
7. *Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И.* Межгодовая изменчивость ледового покрова и первичной продукции Карского моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 578–592.
8. *Добровольский А.Д., Залогин В.С.* Моря СССР. М.: МГУ, 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. *Мошаров С.А.* Распределение первичной продукции и хлорофилла “а” в Карском море в сентябре 2007 г. // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
11. *Мошаров С.А., Демидов А.Б., Симакова У.В.* Особенности процессов первичного продуцирования в Карском море в конце вегетационного периода // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 90–100.
12. *Шеберстов С.В.* Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.

13. *Anonymous*. The Venice System for the classification of marine waters according to salinity // *Limnol. Oceanogr.* 1958. V. 3. P. 346–347.
14. *Arrigo K.R., van Dijken G.L., Bushinsky S.* Primary production in the Southern Ocean, 1997–2006 // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. C08004. <https://doi.org/10.1029/2007JC004551>
15. *Arrigo K.R., van Dijken G.L., Pabi S.* Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 19. <https://doi.org/10.1029/2008GL035028>
16. *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>
17. *Arrigo K.R., van Dijken G.L.* Continued increases in Arctic Ocean primary production // *Progr. in Oceanogr.* 2015. V. 136. P. 60 – 70.
18. *Aitchison J., Brown J.A.C.* The lognormal distribution // *Economic Journal.* 1957. V. 67. P. 713–715.
19. *Bauch D., Hölemann J., Willmes S. et al.* Changes in distribution of brine waters on the Laptev Sea shelf in 2007 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C11008. <https://doi.org/10.1029/2010JC006249>
20. *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>
21. *Bélanger S., Babin M., Tremblay J.-E.* Increasing cloudiness in Arctic damps the increase in phytoplankton primary production due to sea ice receding // *Biogeosciences.* 2013. V. 10. № 6. P. 4087–4101.
22. *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.
23. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere.* 2012. V. 6. P. 881–889.
24. *Comiso J.C.* The rapid decline of multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D11-00113.1>
25. *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>
26. *Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L.* Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L01703. <https://doi.org/10.1029/2007GL031972>
27. *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.
28. *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.
29. *Falkowski P.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // *J. Plankton Res.* 1981. V. 3. P. 203–216.
30. *Frouin R., McPherson J., Ueyoshi K., Franz B.A.* A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data // *Proc. SPIE* 12. <https://doi.org/10.1117/1112.981264>
31. *Golubeva E., Platov G., Malakhova V. et al. 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.
32. *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.
33. IOCCG, 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters. Ed. Sathyendranath S. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada. 140 p.
34. *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>
35. *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>
36. *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.
37. *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.
38. *O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G. et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. C11. P. 24937–24953.
39. *O'Reilly J.E., Maritorena S., O'Brien et al.* SeaWiFS post launch calibration and validation analyses, Part 3 // *NASA Tech. Memo.* 2000. V. 11. 49 p.
40. *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>
41. *Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C. et al.* Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature // *J. Clim.* 2007. V. 20. № 22. P. 5473–5496.
42. *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>

43. *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>
44. *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.
45. *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>
46. *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.
47. *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 Laptev Sea

A. B. Demidov<sup>a, #</sup>, S. V. Sheberstov<sup>a</sup>, V. I. Gagarin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: demspa@rambler.ru*

Study of interannual variability of primary production, surface water temperature, photosynthetically available radiation and sea ice cover in the Laptev Sea was performed based on MODIS-Aqua data (2002–2018). For 17-year period reliable positive trend in surface temperature ( $R^2 = 0.27$ ) and negative trend in photosynthetically available radiation ( $R^2 = 0.24$ ) were established. For the investigated period average annual water temperature in the Laptev Sea increased by 1.38°C and photosynthetically available radiation decreased by 3.4 Ein m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Free water area extended insignificantly (0.15% y<sup>-1</sup>). Total primary production declined by 1.87 TgC or by 1.4% y<sup>-1</sup>. This declining was accompanied by decreasing in area-specific primary production. For the investigated period average annual area-specific primary production values declined by 37.4 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> or by 1.6% y<sup>-1</sup>. Presented results suggest that changes in Laptev Sea primary productivity for the last 17 years, basically, were connected with decreasing in photosynthetically available radiation and area-specific primary production rather than shrinking sea-ice cover.

**Keywords:** primary production, interannual variability, remote sensing, MODIS-Aqua, Laptev Sea