

УДК 581.132:574.583

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА И ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2018 г. А. Б. Демидов¹, *, С. В. Шеберстов¹, В. И. Гагарин¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: demspa@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.05.2017 г.

Исследования межгодовых изменений первичной продукции (ПП) Карского моря, площади, свободной ото льда, и температуры воды выполнены по модельным и спутниковым данным в период с 2002 по 2016 гг. Зарегистрированы достоверные положительные тренды в изменении температуры воды на поверхности во всех районах Карского моря ($R^2 = 0.37-0.61$, $p < 0.05$). Тренды в увеличении площади, свободной ото льда, были достоверны только в эстуарии Енисея. Тренды роста ПП были достоверны в Северном районе моря и в эстуарии Енисея. В целом для Карского моря площадь ледового покрытия сокращалась на 1% в год. Минимум ПП зарегистрирован в 2003 г., а максимум – в 2011 г. В исследованный период ПП Карского моря возрастала в среднем на 2% в год. Наиболее быстро величины ПП Карского моря возрастали в весенний период (апрель–май). Рост годовой ПП происходит в основном за счет увеличения площади, свободной ото льда, а не за счет возрастания скорости фотосинтеза фитопланктона, которая в исследованный период в целом по морю снижалась. Отмечены значительные региональные различия в характере межгодовых изменений ПП в Карском море.

DOI: 10.1134/S0030157418040019

ВВЕДЕНИЕ

Происходящее в последние десятилетия потепление Арктики приводит к увеличению годовой первичной продукции фитопланктона (ПП) [5, 14, 16, 17, 19, 30, 41, 46, 47, 56]. Возрастание ПП достигается, в основном, за счет сокращения площади и толщины ледового покрова, раннего таяния и позднеголедостава и, как следствие, увеличения свободных ото льда акваторий и удлинения вегетационного сезона [14, 25, 26, 28, 38, 40, 52–54, 57, 58]. В свою очередь изменения продуктивности первичного трофического звена, каким является фитопланктон, должны отражаться на всей пищевой цепи в экосистеме [55]. Также, первичная продукция является важной составной частью биогеохимического цикла углерода в Арктике и ее изменчивость влияет на изменения этого цикла [18, 21, 42].

Следует отметить, что увеличение ПП в различных регионах Арктического океана протекает с разной скоростью. Так, в период с 1998 по 2012 гг. увеличение количества дней свободных ото льда, продолжительности вегетационного сезона и годовой первичной продукции было наиболее заметным в секторе Карского моря [17]. Концентрация хлорофилла “а” на поверхности (далее хл “а”), которая использовалась в этих оценках, 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 [43, 44]. Модель первичной продукции, в которую эти данные вводились, была единой для всего Арктического океана [15, 46].

В тоже время, одним из путей совершенствования оценок ПП и представлений о ее долговременной изменчивости является использование региональных алгоритмов расчета, как первичной продукции, так и концентрации хл “а” [20, 39]. На базе данных, собранных в экспедициях в Карское море такие алгоритмы разработаны для расчета концентрации поверхностного хл “а” [11] и интегральной для столба воды первичной продукции (ИПП) [7]. Недавно с использованием этих региональных моделей и данных сканера цвета океана MODIS-Aqua проведены исследование сезонной изменчивости ИПП и хл “а” [8] и оценка годовой величины первичной продукции Карского моря [9].

Следующим шагом изучения долговременной изменчивости ПП Карского моря можно считать проведение оценки ее межгодовой изменчивости. В настоящее время мы можем описать динамику годовой первичной продукции Карского на основе созданных моделей и спутниковых данных,

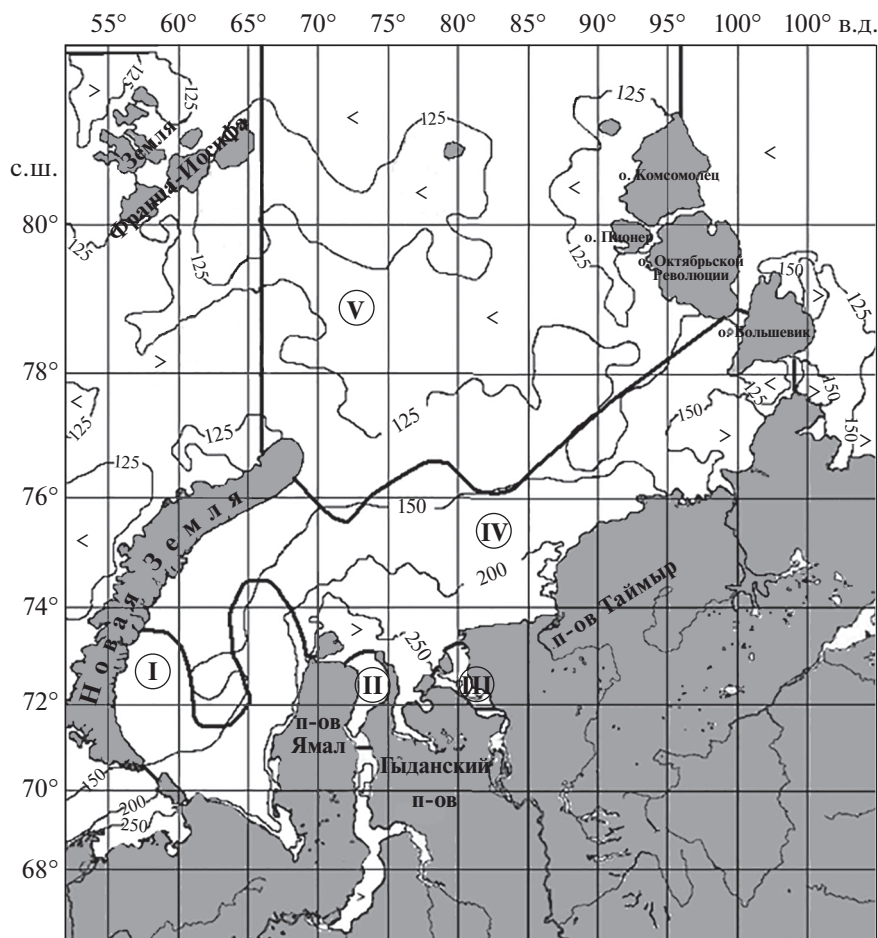


Рис. 1. Среднегодовое (2002–2015 гг.) величины интегральной первичной продукции (mgC/m^2 в день) в различных районах Карского моря. I – Юго-западный район; II – эстуарий Оби; III – эстуарий Енисея; IV – Район речного выноса; V – Северный район. Границы Карского моря проведены согласно [33].

опираясь на более длинный, чем в предыдущих работах, временной ряд. Поэтому, целями настоящей статьи являлись: (1) – описание межгодовых изменений ПП в различных районах Карского моря с 2002 по 2016 гг. и (2) – оценка роли в этом процессе изменчивости абиотических факторов, таких как площадь ледового покрова и температура воды на поверхности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Районирование Карского моря. Границы Карского моря были определены, исходя из предыдущих работ по оценке ПП Арктического океана [33]. Опираясь на разработанную ранее классификацию водных масс (ВМ) [48] и подходы к районированию Карского моря [29] на исследованной акватории мы выделили Юго-западный район (I), эстуарии Оби (II) и Енисея (III), Район речного выноса (IV) и Северный район, включающий желоба Св. Анны и Воронина (V). На рис. 1

границы районов Карского моря показаны на фоне среднегодовоей картины распределения ИПП. По сравнению с предыдущей работой [29] южная граница Района речного выноса, ориентированная на среднегодовое положение изогалины 25 psu на поверхности [48], была скорректирована, исходя из данных о положении квазистационарной распресненной линзы в районе Новой Земли [10, 37].

Региональные модели первичной продукции и хлорофилла. Оценка ПП фитопланктона проводилась с использованием эмпирических моделей первичной продукции и хлорофилла. Эти модели были разработаны и верифицированы на основе базы данных, созданной по материалам экспедиций в Карское море в конце августа–начале октября [1, 7, 11–13, 29]. В разработанном нами региональном алгоритме ИПП Карского моря [7] в качестве коэффициентов модели использованы средние для всей акватории величины эффектив-

ности утилизации солнечной энергии в столбе воды

$$\psi = \text{ДАЧ}_c / I_0, \quad (1)$$

где ДАЧ_c – среднее в слое фотосинтеза дневное ассимиляционное число (мгС/мг хл "а"), а I_0 – величина дневной подповерхностной ФАР (Ein/м^2) [31] и индекс вертикального распределения хл “а”

$$k = \text{Хл}_{\text{фс}} / \text{Хл}_0, \quad (2)$$

где $\text{Хл}_{\text{фс}}$ – интегральное значение хлорофилла в слое фотосинтеза, а Хл_0 – его концентрация на поверхности. Ранее эффективность этой модели была тестирована в рамках PPARR (Primary production algorithm round robin) [22]. Средняя геометрическая величина произведения $k \times \psi$ для акватории Карского моря равняется 8.27 [7].

Входящими в модель параметрами являются величины содержания Хл_0 и дневной приходящей ФАР (I_0). Эти показатели сравнительно легко определяются в полевых условиях. Таким образом, при использовании формул (1), (2), а также Хл_0 и I_0 итоговое уравнение принимает вид

$$\text{ИПП} = 8.27 \text{Хл}_0 I_0. \quad (3)$$

Известно, что универсальный алгоритм MODIS OC3Mv6, а также адаптированные для Арктического океана алгоритмы OC4L и OC4P дают большую ошибку в определении концентрации хл “а” в водах второго оптического типа (Case II). К этому типу относятся значительные площади его акватории и, в частности, Карское море [34, 35, 41]. Для того, чтобы избежать больших ошибок в определении ИПП, мы использовали региональный алгоритм расчета Хл_0 [11], где наилучшая корреляция измеренных и расчетных величин хл “а” ($R^2 = 0.47$; $N = 185$) была получена при использовании отношения коэффициентов яркости моря на длинах волн 531 и 547 нм $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$:

$$\ln(\text{Хл}_0) = -3.66 \ln(R_{rs}(531)/R_{rs}(547)) + 0.116. \quad (4)$$

Спутниковые данные. Данные сканера цвета MODIS-Aqua L2 уровня с разрешением 9×9 км за период с 2002 по 2015 гг., получены с сайта National Aeronautics and Space Administration (NASA) www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/. Данные по фотосинтетически активной радиации использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua [32]. Как было отмечено в этой работе, модельные величины ФАР превышали измеренные. Анализ результатов измерений ФАР Карского моря также показал систематическое завышение спутниковых значений. В среднем отношение измеренных и спутниковых величин оказалось равным 0.64 ($N = 30$, $cv = 20\%$). Основываясь на этом эмпирическом отношении, мы использовали по-

лученное значение как поправочный коэффициент для спутниковой ФАР.

Величины первичной продукции рассчитывались для каждого пикселя, где имелись данные по Хл_0 и ФАР. Площади акваторий, занятых водами одной цветовой градации рассчитывались с помощью программного обеспечения [51]. Данные по концентрации Хл_0 и ФАР усреднялись по месяцам, с апреля по октябрь, за период 2002–2015 гг. При этом средние величины этих параметров экстраполировались на площади, которые были закрыты облаками в течение исследованного периода. Известно, что данные MODIS-Aqua доступны с июля 2002 г. Данные за апрель, май и июнь 2002 г. были восстановлены путем осреднения величин ПП и Хл_0 в этот период времени за 2003–2015 гг. Сумма месячных (апрель–октябрь) величин ПП представляет собой годовую первичную продукцию за конкретный год.

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 [49].

Площадь акватории покрытой льдом рассчитывалась с помощью программного обеспечения [51] по первичным данным, полученным с сайта NSIDC (National Snow and Ice Data Center) ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02202_v2/north/daily [27]. Использовались данные, полученные Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) с разрешением 25×25 км. Свободной ото льда в среднем за месяц считалась площадь моря, на которой концентрация льда была $<15\%$. Расчеты концентрации льда, площадей покрытых льдом и свободных ото льда основаны на алгоритме NASA [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Среднегодовое значение величины ИПП (мгС/м^2 в день) (рис. 1) дает представление о продукционном фоне, на котором происходит ее межгодовые изменения. Эстуарии Оби и Енисея и примыкающие к ним акватории Района речного выноса заняты водами с первичной продукцией $>250 \text{ мгС/м}^2$ в день. Южная часть этого района характеризуется величинами ИПП в диапазоне от 200 до 250 мгС/м^2 в день. Остальную акваторию Района речного выноса занимают воды с ИПП равной $125\text{--}200 \text{ мгС/м}^2$ в день. Такой же диапазон величин ИПП характерен и для Юго-западного района. Величины пер-

Таблица 1. Параметры линейного тренда ($y = a + bx$) межгодовых (2002–2016 гг.) изменений первичной продукции (ПП, $\times 10^{12}$ гС в год), среднегодовой площади, свободной ото льда (S , $\times 10^3$ км²), среднегодовой площади, покрытой льдом (S льда, $\times 10^3$ км²) и среднегодовой температуры воды на поверхности (T_0 , °С) в различных районах Карского моря

Параметр	Статистический показатель	Юго-западный район	Эстуарий Оби	Эстуарий Енисея	Район речного выноса	Северный район	Карское море
ПП	a	–41	–11	–13	–138	–288	–438
	b	0.02	0.01	0.01	0.07	0.15	0.22
	R^2	0.05	0.25	0.30	0.08	0.31	0.17
S	a	1501	–171	–213	–1290	–11079	–1057
	b	–0.70	0.09	0.11	0.72	5.59	5.48
	R^2	0.05	0.25	0.32	0.01	0.22	0.07
S льда	a	–1507	182	218	1648	11462	11361
	b	0.78	–0.09	–0.1	–0.73	–5.59	–5.41
	R^2	0.06	0.24	0.31	0.01	0.22	0.07
T_0	a	–496	–478	–558	–349	–140	–274
	b	0.25	0.24	0.28	0.18	0.07	0.14
	R^2	0.61	0.47	0.58	0.55	0.37	0.47

Примечание. a и b – коэффициенты линейной регрессии; R^2 – коэффициент детерминации. Выделены статистически достоверные параметры при $p < 0.05$; $N = 15$.

вичной продукции в Северном районе находятся в диапазоне 125–150 и < 125 мгС/м² в день.

В течение последних 15-ти лет (2002–2016 гг.) в Карском море отмечен достоверный ($p < 0.05$) положительный тренд температуры воды на поверхности (T_0) ($R^2 = 0.47$) (рис. 2, табл. 1). Показатель межгодовой изменчивости (ПМИ), вычисляемый как (максимум – минимум)/среднее, составил 147%. Наиболее явно тренд был выражен в Юго-западном районе, Районе речного выноса и в эстуарии Енисея ($R^2 > 0.50$). Наименее заметным увеличением T_0 было в Северном районе ($R^2 = 0.37$).

Среднегодовая площадь ледового покрова (S льда) имела тенденцию к сокращению во всех районах и в целом по морю (+1% в год), за исключением Юго-западного района (рис. 3). Следует отметить, что статистически достоверный тренд удалось проследить только в эстуарии Енисея ($R^2 = 0.31$, $p < 0.05$) (табл. 1). В Юго-западном районе, Районе речного выноса, Северном районе и в целом в Карском море площадь ледового покрова сокращалась с 2002 по 2012 гг., а в последние четыре года происходило ее увеличение. В эстуариях Оби и Енисея заметное сокращение S льда наблюдалось лишь в последние два года (2015 и 2016 гг.).

В открытых районах Карского моря (Юго-западный, Северный районы и Район речного выноса) в 2011 и 2012 гг. была зарегистрирована ми-

нимальная среднегодовая площадь ледового покрытия (24–37%). Для всего Карского моря эта величина составила 34 и 39%, соответственно. В эстуариях Оби и Енисея минимальные среднегодовые значения площади ледового покрытия зафиксированы в 2015 и 2016 гг. (50–53% и 52–57%, соответственно) (рис. 3).

Максимальные среднегодовые площади льда в Районе речного выноса, Северном районе и во всем Карском море были отмечены в 2003 г. (65, 93 и 74%, соответственно). В Юго-западном районе максимум (59%) зарегистрирован в 2015 и 2016 гг. В эстуариях Оби и Енисея с 2002 по 2014 гг. среднегодовая площадь ледового покрытия существенно не изменялась. Небольшое, до 70–72%, увеличение наблюдалось лишь на акватории Обского эстуария (рис. 3).

В соответствии с сокращением ледяного покрова, площадь акватории моря, свободной ото льда слабо увеличивалась, за исключением Юго-западного района (рис. 4). Также как и в случае с площадью ледового покрытия, достоверным трендом был отмечен только в эстуарии Енисея ($R^2 = 0.32$, $p < 0.05$) (табл. 1). ПМИ площади акватории, свободной ото льда для всего моря был равен 83%.

Во всем Карском море и его районах годовая первичная продукция (10^{12} гС в год) в период с 2002 по 2016 гг. увеличивалась на 2% в год (рис. 5). Изменения ПП соответствовали изменчивости

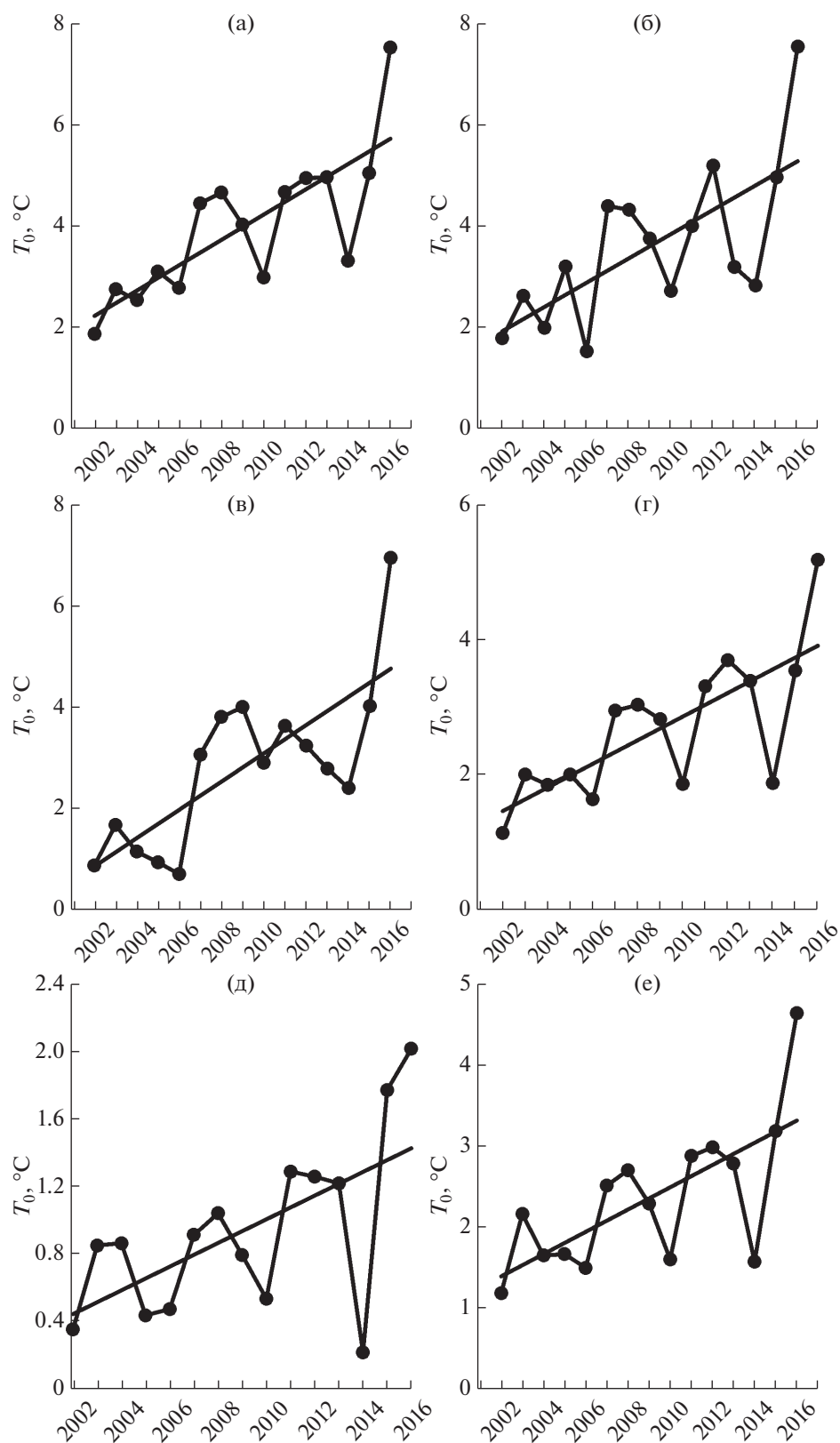


Рис. 2. Межгодовые изменения и линейные тренды температуры воды на поверхности (T_0) в различных районах Карского моря в период с 2002 по 2016 гг. (а) – Юго-западный район; (б) – эстуарий Оби; (в) – эстуарий Енисея; (г) – Район речного выноса; (д) – Северный район; (е) – Карское море.

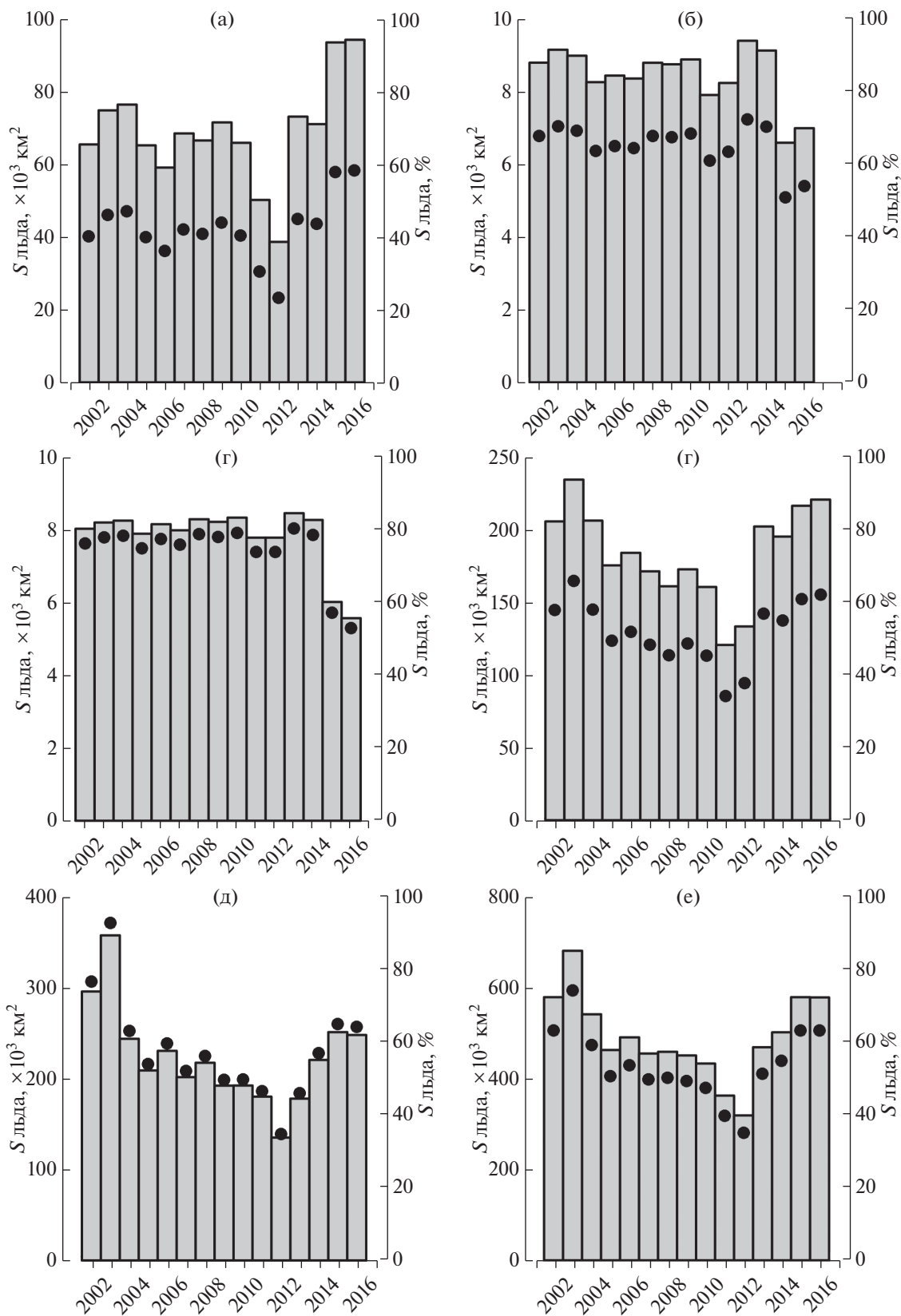


Рис. 3. Межгодовые изменения площади ледового покрытия ($S_{\text{льда}}$) в различных районах Карского моря в период с 2002 по 2016 гг. Столбики – абсолютные величины, точки – проценты. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

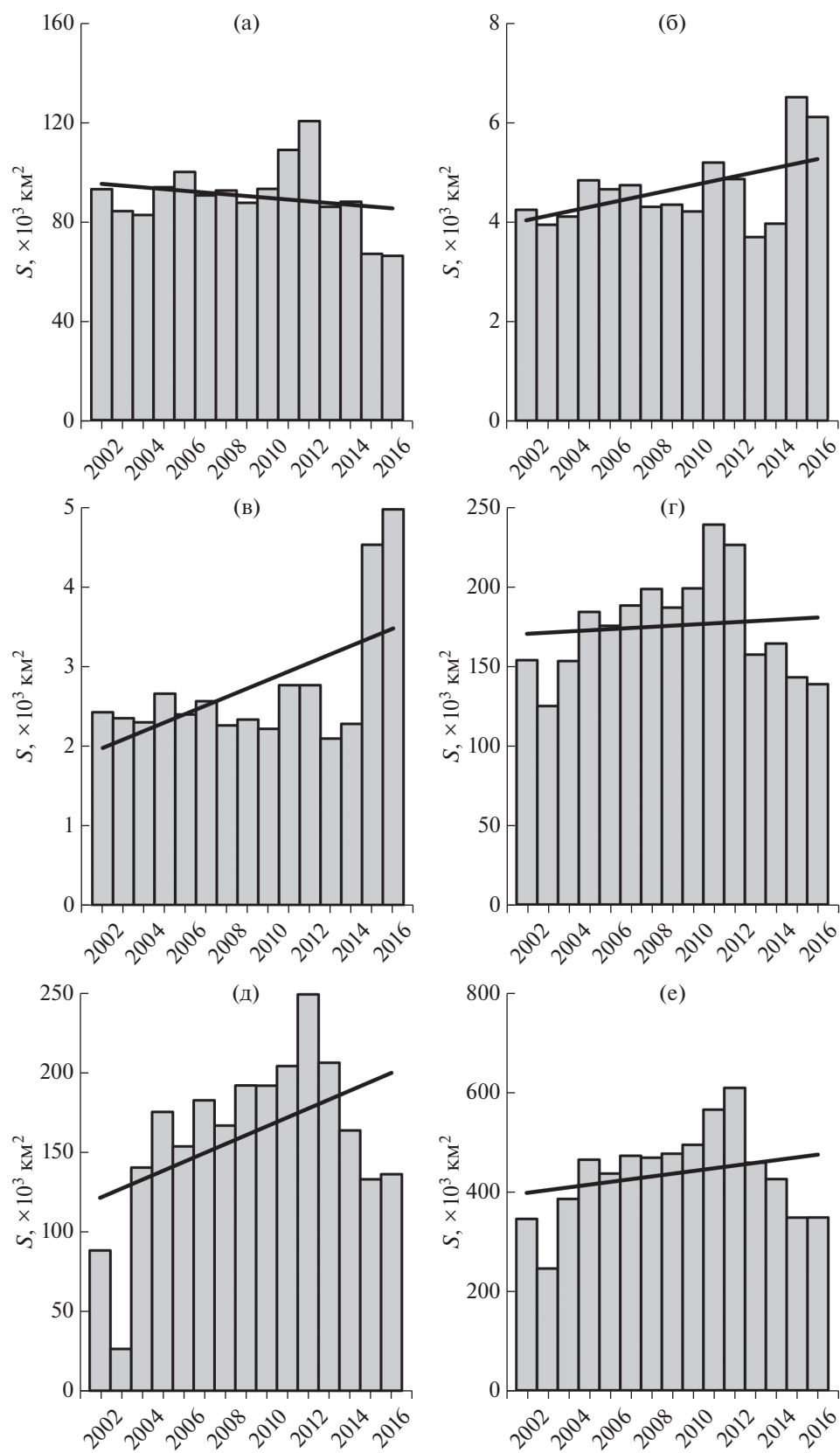


Рис. 4. Межгодовые изменения и линейные тренды площади, свободной ото льда (S), в различных районах Карского моря в период с 2002 по 2016 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

Таблица 2. Статистические показатели линейных ($y = a + bx$) зависимостей первичной продукции (ПП, $\times 10^{12}$ гС в год) от среднегодовых величин площади, свободной ото льда (S , $\times 10^3$ км²) и температуры воды на поверхности (T_0 , °С) в различных районах Карского моря

Переменные	Статистический показатель	Юго-западный район	Эстуарий Оби	Эстуарий Енисея	Район речного выноса	Северный район	Карское море
y – ПП, x – S	a	0.85	-0.01	-0.03	1.23	0.46	4.15
	b	0.02	0.06	0.06	0.03	0.02	0.02
	R^2	0.42	0.88	0.97	0.64	0.81	0.64
y – ПП, x – T_0	a	2.48	0.18	0.07	5.39	2.92	11.24
	b	0.07	0.02	0.02	0.32	0.79	0.87
	R^2	0.05	0.46	0.42	0.09	0.12	0.11

Примечание. a и b – коэффициенты линейной регрессии; R^2 – коэффициент детерминации. Выделены статистически достоверные параметры при $p < 0.05$; $N = 15$.

площади, свободной ото льда. Межгодовая изменчивость ПП характеризовалась ПМИ, равным 76%. Статистически достоверный тренд ($p < 0.05$) отмечался в эстуарии Енисея и Северном районе ($R^2 = 0.30$ и 0.31 , соответственно) (табл. 1). В Юго-западном районе увеличение ПП в 1.7 происходило с 2009 по 2012 гг. при незначительном позитивном тренде. В эстуариях Оби и Енисея следует отметить резкое увеличение ПП в последние три года (в 1.8 и 3.3 раза, соответственно). В Районе речного выноса на фоне очень слабого положительного тренда максимум годовой первичной продукции отмечался в 2011 г. В Северном районе при наиболее значимом из всех рассматриваемых районов увеличении ПП, существенный (в 1.6 раза) рост значений этого показателя был отмечен с 2009 по 2012 гг. (рис. 5). Во всех районах Карского моря, за исключением эстуария Енисея, минимальные значения ПП наблюдались в 2003 г. (рис. 5), когда на этих акваториях в среднем за год была зарегистрирована близкая к максимальной площадь ледового покрытия (рис. 3). В целом для Карского моря рост годовых величин первичной продукции с 2002 по 2016 гг. был незначительным ($R^2 = 0.17$). Следует отметить лишь максимум в 2011–2012 гг., который был в 1.5 выше значений 2009 г., с которого происходил рост ПП.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Межгодовая изменчивость первичной продукции, ледового покрова и температуры воды. Межгодовая изменчивость первичной продукции различных районов Карского моря находилась в прямой зависимости от площади, свободной ото льда ($R^2 = 0.42$ – 0.97). В целом для Карского моря межгодовая изменчивость ПП на 64% зависела от размера площади, свободной ото льда (табл. 2). Сокращение площади ледового покрытия и увеличение свободной акватории с 2002 по 2016 гг.

привело к увеличению ПП в этот период. Такой результат хорошо согласуется с данными предыдущих наблюдений за межгодовой изменчивостью первичной продукции Арктического океана [16, 17, 46].

Следует отметить, что этот рост имеет экстенсивный характер, а по поводу роли интенсивности фотосинтеза, под которой мы в данном случае понимаем величину ПП под метром квадратным в день, в увеличении годовых значений суммарной ПП существуют разные мнения. Одни авторы считают, что интенсивность фотосинтеза в Арктическом океане повышается и влияет на рост суммарной ПП [46]. Другие не отмечают этого эффекта [16]. Исследование межгодовой изменчивости ИПП нормированной на площадь (мгС/м² в день) показало, что интенсивность фотосинтеза в исследованный период в различных районах Карского моря изменялась статистически недостоверно ($R^2 = 0.00$ – 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%. Таким образом, рост первичной продукции Карского моря, по-видимому, в ближайшие годы может происходить в основном за счет увеличения свободных ото льда площадей. В предыдущей работе [9] было показано, что при реализации прогноза потепления Арктики [36, 45] и полном освобождении ее акватории ото льда годовая первичная продукция Карского моря увеличится приблизительно в 5 раз. При этом годовая ПП Карского моря будет в 2–4 раза ниже, уровня, характерного для продуктивных районов Арктики, например, Баренцева моря, который приводится в разных работах [5, 6, 17, 33, 50].

Сокращение среднегодовой площади ледового покрова в 2002–2016 гг. происходило на фоне довольно значительного роста T_0 (рис. 2). Тем не менее, достоверную зависимость S , свободной

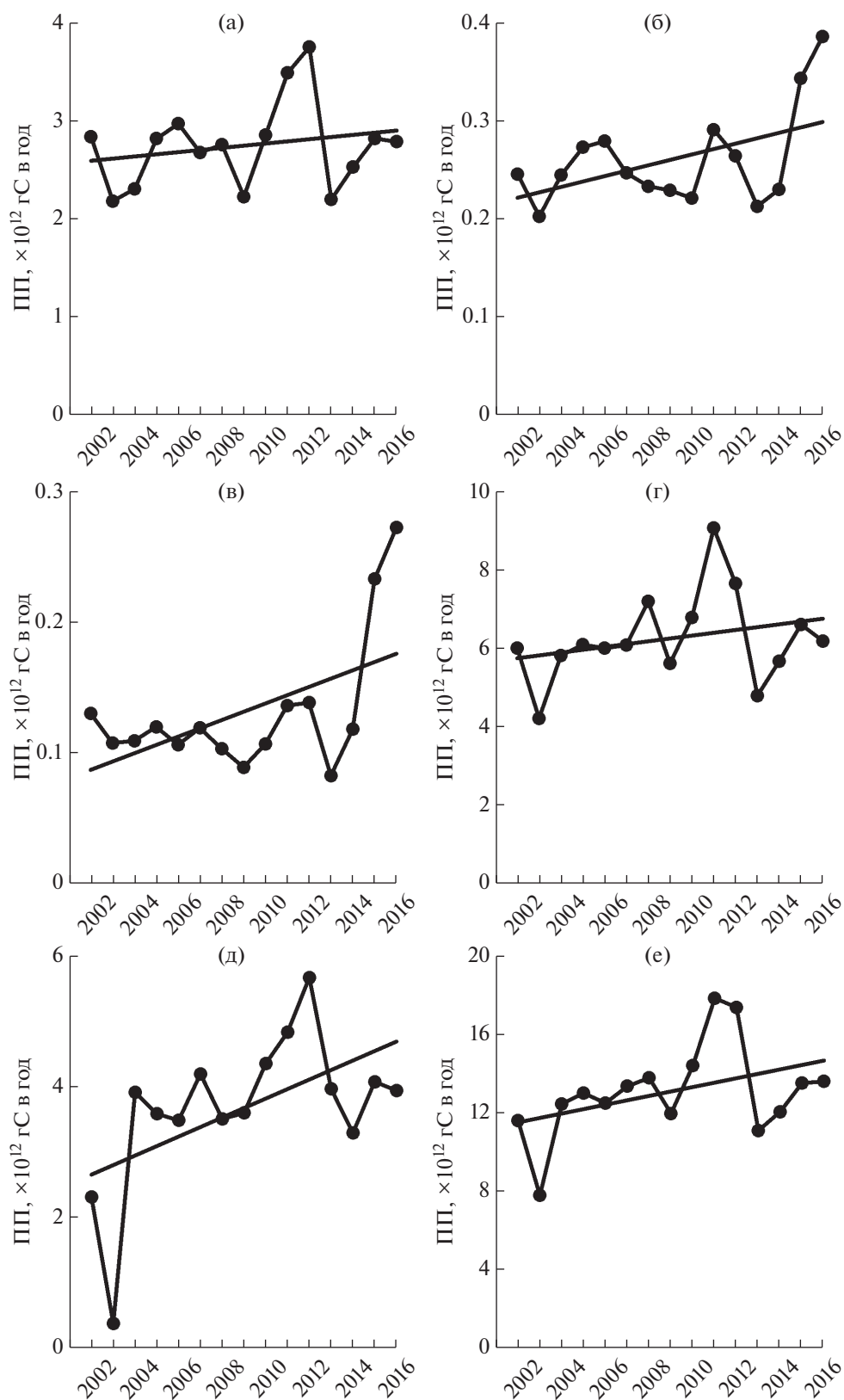


Рис. 5. Межгодовые изменения и линейные тренды первичной продукции (ПП), в различных районах Карского моря в период с 2002 по 2016 гг. Обозначения районов см. в подписях к рис. 2.

ото льда, от T_0 удалось проследить только в эстуариях Оби и Енисея ($R^2 = 0.50$ и 0.46 , соответственно). В остальных районах и в целом в Карском море эта связь была слабой и недостоверной ($R^2 = 0.002-0.07$). В свою очередь, годовая первичная продукция достоверно коррелировала с поверхностной температурой только в эстуариях Оби и Енисея ($R^2 = 0.46$ и 0.42 , соответственно) и практически не зависела от этого параметра на остальной акватории Карского моря (табл. 2). Такой результат можно объяснить тем, что динамика площади ледового покрытия зависит не только от изменчивости температуры воды на поверхности, но и от скорости и направления дрейфа льда, который определяется ветром и течениями [см. например: 26, 59]. Кроме этого, долговременная изменчивость ледового покрова на замкнутой с юга, запада и востока материком и островами акватории Карского моря, подверженной речному стоку, может в меньшей степени зависеть от повышения температуры воды, чем в более открытых морях Арктики. В Карском море у крупных островов формируются Новоземельский и Североземельский ледовые массивы, таяние которых происходит позже, чем в открытой центральной части моря. Сезонную динамику ледового покрова Карского моря определяет также адвекция речного льда из эстуариев Оби и Енисея.

Так как достоверные межгодовые изменения ПП и площади, свободной ото льда, не удалось проследить для всей акватории Карского моря, опираясь на среднегодовые величины, представляет интерес исследование этих изменений для разных сезонов года. Также такой анализ интересен с точки зрения оценки вклада разных сезонов в межгодовую динамику этих параметров. На рис. 6 показаны межгодовые изменения сезонных ПП и площади, свободной ото льда, весной (апрель–май), летом (июнь–август) и осенью (сентябрь–октябрь).

Весной достоверные положительные тренды ПП с коэффициентами детерминации $0.32-0.38$ зафиксированы для Района Речного выноса, Северного района и для всего моря (в эстуариях Оби и Енисея данные для весеннего периода отсутствуют). Для Юго-западного района также отмечен позитивный тренд, но он оказался статистически недостоверным ($R^2 = 0.23$, $p < 0.05$). Достоверные тренды межгодовых изменений S , свободной ото льда, получены во всех районах и для моря в целом ($R^2 = 0.30-0.48$). При этом на всей акватории Карского моря весной изменчивость ПП была тесно связана с динамикой площади, свободной ото льда ($R^2 = 0.81-0.98$). Летом достоверные межгодовые тренды отмечены для ПП и для S , свободной ото льда, лишь в эстуарии Енисея ($R^2 = 0.31$ и 0.30 , соответственно). Связь величин первичной продукции с площадью, сво-

бодной ото льда в разных районах моря была менее выражена, чем весной ($R^2 = 0.52-0.96$). Осенью достоверные межгодовые тренды ПП и S , свободной ото льда, прослеживаются только в Юго-западном районе. Для обоих показателей $R^2 = 0.36$. Связь между этими параметрами оказалась наименее выраженной в году. Величины R^2 варьировали от 0.01 в эстуарии Оби до 0.76 в эстуарии Енисея.

По результатам проведенного анализа можно заключить, что возрастание годовых величин ПП Карского моря происходит, в основном, за счет весеннего периода. Это возрастание обусловлено более интенсивным, чем в другие сезоны года, сокращением площади ледового покрова (рис. 6). Интересно, что аналогичные результаты были получены ранее для всего Арктического океана [46]. В этой работе было показано, что в весенний период (май–июнь) межгодовые изменения ПП прослеживаются наиболее отчетливо, тогда как осенью (август–сентябрь) они практически не выражены.

Сравнение с результатами предыдущих исследований. При всей своей условности, которая определяется, в основном, различными временными рамками исследований, а также выбранными разными авторами границами Карского моря, представляет интерес сравнение полученных нами результатов с проведенными ранее работами.

Распределение среднесезонных величин ИПП, показанное на рис. 1, довольно хорошо соответствует, полученным ранее, но более генерализованным, картам, в основе которых лежат расчеты первичной продукции по концентрации поверхностного хлорофилла [2, 4]. Отличия наблюдаются в основном в эстуариях Оби и Енисея и прилегающих к ним районах, где в предыдущих работах зарегистрированы высокие > 500 и $200-500$ мгС/м² в день величины ИПП. Эти различия связаны, главным образом, с используемыми продукционными алгоритмами. Существует мнение, что модели первичной продукции, использующие в качестве входящего параметра только концентрацию хлорофилла, могут завышать величину ИПП в водах второго оптического типа [34, 35] и на акваториях с низкой температурой воды [23].

В исследованный нами период нормированная на площадь первичная продукция Карского моря снижалась за год в среднем на 0.31 мгС/м² в день. Такой результат оказался очень близким к опубликованному в предыдущей работе, в которой авторы использовали данные сканеров SeaWiFS и MODIS за период с 1998 по 2006 гг. [3]. Если ориентироваться на данные MODIS, то в период с 2002 по 2006 г. ИПП Карского моря снижалась за год в среднем на 0.38 мгС/м² в день. Следует отметить, что в цитируемой работе исследование

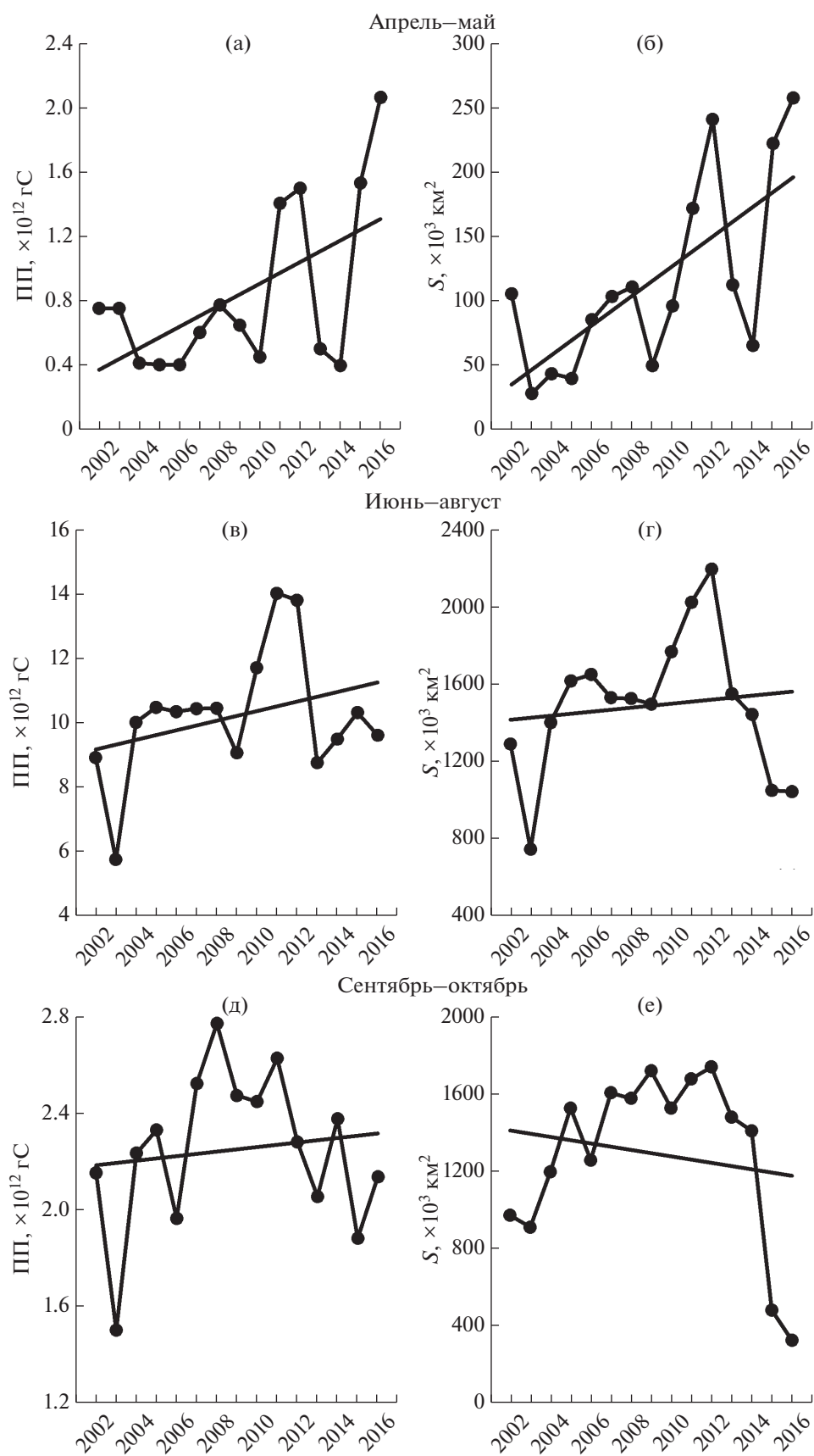


Рис. 6. Межгодовые изменения и линейные тренды первичной продукции (ПП) и площади, свободной ото льда (S), в Карском море в период с 2002 по 2016 гг. весной (а, б), летом (в, г) и осенью (д, е).

межгодовой динамики ИПП проводилось на полигоне, расположение которого приблизительно соответствует выделенному нами Району речного выноса. Сравнение межгодовых изменений ИПП в этом районе по нашим данным и по данным Ветрова и Романкевича показывает некоторые расхождения (-0.31 и 0.06 мгС/м² в день, соответственно). Суммарная годовая первичная продукция в Районе речного выноса в 2004 и 2005 гг. была незначительно выше, чем в предыдущие и последующие годы [3]. По нашим данным в 2003 г. произошло резкое, почти в 1.5 раза, снижение ПП, связанное с максимальным развитием площади ледового покрова в этом году (рис. 3 и 5). В 2004–2006 гг. динамика ПП была схожей с данными предшествующей работы.

Результаты исследований межгодовой изменчивости первичной продукции и площади ледового покрытия Карского моря показали, что последняя снижалась в период с 2003 по 2008 г. на 10.5% в год, а суммарная годовая ПП возрастала на 8% в год [4]. Более длинный временной ряд межгодовых изменений (2003–2012 гг.) ПП Карского моря был исследован с использованием данных сканера MODIS-Aqua [5]. В цитируемой работе суммарная годовая первичная продукция оставалась практически неизменной с 2003 по 2007 гг. Затем ПП возрастала, достигла максимума в 2010 г. и незначительно снизилась к 2012 г. По нашим данным ПП Карского моря слабо возрастала с 2002 по 2007 г. В последующем произошло возрастание суммарной годовой первичной продукции приблизительно в 1.5 раза к 2011 и 2012 гг. и снижение ее величины в 2013 г. В 2014–2016 гг. ПП увеличилась приблизительно в 1.2 раза. Таким образом, при похожей картине межгодовых изменений ПП в сравниваемых работах, наблюдается смещение примерно на год максимальной величины годовой первичной продукции. Эти расхождения могут быть связаны как с объемом спутниковых данных, используемых в сопоставляемых работах, так и с различиями в подходе к моделированию первичной продукции у разных авторов.

Межгодовая динамика площади, свободной ото льда и годовой ПП, в период с 2002 по 2009 гг., полученная нами, очень хорошо согласуется результатами исследований многолетних трендов в Арктическом океане [16]. Так же, как и в настоящей работе, этими авторами зарегистрирован минимум “открытой воды” и ПП в 2003 г. и высокие величины этих параметров в 2007 и 2008 гг. Такое совпадение произошло, несмотря на различия в подходе к определению географических границ района исследований. В статье [16] исследуется так называемый “Карский сектор”, в то время как в настоящей работе авторы придерживаются географических границ Карского моря, согласно [33]. Близкая к представленной в настоящей ра-

боте кривая межгодовых изменений ПП Карского моря получена также при сравнении эффективности различных алгоритмов в Арктическом океане [41].

Анализ ряда наблюдений с 1998 по 2012 гг. показал, что годовая ПП Карского моря достоверно увеличивалась на 4% в год ($R^2 = 0.58$, $p = 0.001$) [17]. Близкие величины возрастания первичной продукции в Карском море (приблизительно, 1–7%) приводятся по результатам анализа ее изменчивости в период с 1998 по 2010 гг. [19]. Такая скорость увеличения ПП, полученная этими авторами, оказалась немного выше, рассчитанной нами за период с 2002 по 2016 г. (2% в год). Таким образом, по нашим данным за исследованный период (14 лет) суммарная первичная продукция Карского моря увеличилась на 28%.

Расхождения в оценке скорости увеличения суммарной ПП Карского моря у разных авторов объясняется различиями во времени, в течение которого проводились исследования ее межгодовой изменчивости. Предыдущие исследования заканчивались 2012 г., когда были достигнуты близкие к максимуму величины ПП за весь период наблюдений, начиная с 1998 г., когда развертывание программы SeaWiFS позволило получать достоверные данные об изменчивости первичной продукции Арктического океана. Постоянный рост суммарной ПП в эти годы и резкий максимум в 2011 и 2012 гг. позволил охарактеризовать “Карский сектор”, как район Арктического океана, в котором первичная продукция увеличивается наиболее быстро [17, 46]. Этот рост за время с 1998 по 2012 г. в секторах Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря составил 68–112% [17]. Однако, в последующие годы ПП Карского моря росла не столь динамично (рис. 5). В 2013 г. суммарная ПП в 1.6 раза снизилась по сравнению с максимальным значением 2011 г., а в 2014–2016 гг. ее рост составил в среднем 7% в год.

В настоящей работе мы использовали региональные алгоритмы первичной продукции и хлорофилла для изучения межгодовых изменений суммарной годовой ПП Карского моря. Следует отметить, что в целом при таком подходе картина межгодовых изменений ПП не сильно отличалась от результатов предыдущих исследований. Отличия были получены ранее только по абсолютным значениям годовой ПП [9].

Авторы благодарят GSFC DAAC (Goddard Space Flight Center, Distributed Active Center) NASA за возможность использования спутниковой информации сканера MODIS-Aqua, а также NSIDC NOAA за предоставление доступа к данным по площади ледового покрытия. Работа выполнена в рамках Государственного задания ФАНО № 0149-2018-0035.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Ветров А.А. Хлорофилл, первичная продукция и потоки органического углерода в Карском море // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 1. С. 38–47.
3. Ветров А.А., Романкевич Е.А. Межгодовая изменчивость первичной продукции и потоков органического углерода в Арктических морях России // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 3. С. 371–380.
4. Ветров А.А., Романкевич Е.А. Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в Арктических морях, ответ на современное потепление // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 2. С. 266–277.
5. 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.
6. Виноградов М.Е., Ветров 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.
7. Демидов А.Б., Мошаров С.А., Артемьев В.А. и др. Интегрированная и разрешающая по глубине модели первичной продукции Карского моря // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 4. С. 563–576.
8. Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И., Хлебопашев П.В. Сезонная изменчивость первичной продукции фитопланктона Карского моря по спутниковым данным // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 103–117.
9. Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И. Оценка годовой величины первичной продукции Карского моря // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 3.
10. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
11. 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.
12. Мошаров С.А. Распределение первичной продукции и хлорофилла “а” в Карском море в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
13. Мошаров С.А., Демидов А.Б., Симакова У.В. Особенности процессов первичного продуцирования в Карском море в конце вегетационного периода // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 90–100.
14. Arrigo K.R., van Dijken G.L., Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 19. doi 10.1029/2008GL035028
15. Arrigo K.R., van Dijken G.L., Bushinsky S. Primary production in the Southern Ocean, 1997–2006 // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. C08004. doi 10.1029/2007JC004551
16. Arrigo K.R., van Dijken G.L. Secular trends in Arctic Ocean net primary production // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C09011. doi 10.1029/2011JC007151
17. Arrigo K.R., van Dijken G.L. Continued increases in Arctic Ocean primary production // *Progr. in Oceanogr.* 2015. V. 136. P. 60–70.
18. Bates N.R., Mathis T. The Arctic Ocean marine carbon cycle: Evaluation of air-sea CO_2 exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks // *Biogeosciences*. 2009. V. 6. № 11. P. 2433–2459.
19. 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.
20. Ben Mustapha S., Larouche P., Bélanger S. Evaluation of ocean color algorithms in the Southeastern Beaufort Sea: new parameterization using SeaWiFS, MODIS and MERIS spectral bands // *Can. J. Rem. Sens.* 2012. V. 38. № 5. P. 535–556.
21. Cai W.-J., Chen L., Chen B. et al. Decrease in the CO_2 uptake capacity in an ice free Arctic Ocean basin // *Science*. 2010. V. 329. № 5991. P. 556–559.
22. Campbell J., Antoine D., Armstrong R., et al. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16. doi 10.1029/2001GB001444
23. Carr M.-E., Friedrichs M.A.M., Schmeltz M. et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color // *Deep-Sea Res. II*. 2006. V. 53. P. 741–770.
24. 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.
25. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 881–889.
26. Comiso J.C. The rapid decline of multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. doi 10.1175/JCLI-D11-00113.1
27. 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
28. Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophys.*

- Res. Lett. 2008. V. 35. L01703. doi 10.1029/2007GL031972
29. 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.
 30. Dupont F. Impact of sea-ice biology on overall primary production in a biophysical model of the pan-Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C00D17, doi 10.1029/2011JC006983
 31. Falkowski P. Light-shade adaptation and assimilation numbers // *J. Plankton Res.* 1981. V. 3. P. 203–216.
 32. 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. <http://dx.doi.org/10.1117/1112.981264>
 33. 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.
 34. 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.
 35. IOCCG, 2015. Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas. Eds. Babin M. et al. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 16, IOCCG, Dartmouth, Canada. 130 p.
 36. IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
 37. Kubryakov A., Stanichny S., Zatsepin A. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // *Rem. Sens. Env.* 2016. V. 176. P. 177–187.
 38. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M. et al. Thinning and volume loss of Arctic sea ice: 2003–2008 // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C07005. doi 10.1029/2009JC005312
 39. Lee Z., Marra J., Perry M.J., Kahru M. Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: A strategic assessment // *J. Mar. Sys.* 2015. V. 149. P. 50–59.
 40. 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.
 41. 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.
 42. MacGilchrist G.A., Naveira Garabato A.C., Tsubouchi T. et al. The Arctic Ocean carbon sink // *Deep-Sea Res. I.* 2014. V. 86. P. 39–55.
 43. 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.
 44. 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.
 45. Overland J.E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. № 10. P. 2097–2101.
 46. 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
 47. 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.
 48. 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.
 49. 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.
 50. 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.
 51. Sheberstov S.V., Lukyanova E.A. A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field bio-optical data // Proceedings of IV international conference “Current problems in optics of natural waters”, Nizhny Novgorod. 2007. P. 179–183.
 52. Stroeve J., Holland M., Meier W. et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L09501. doi 10.1029/2007GL029703
 53. 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. doi 10.1029/2012GL052676
 54. 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.
 55. 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.
 56. Vancoppenolle M., Bopp L., Madec G. et al. Future Arctic Ocean primary productivity from CMIP5 simulations: Uncertain outcome, but consistent mechanisms // *Global Biogeochem. Cycle.* 2013. V. 27. P. 605–619. doi 10.1002/gbc.20055
 57. Zhang J., Ashjian C., Campbell R. et al. The great 2012 Arctic Ocean summer cyclone enhanced biological productivity on the shelves // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 297–312. doi 10.1002/2013JC009301
 58. Zhang J., Spitz Y.H., Steele M. et al. Modeling the impact of declining sea ice on the Arctic marine planktonic ecosystem // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C10015. doi 10.1029/2009/JC005387
 59. Zhang Y., Chen C., Beardsley R.C. et al. Seasonal and interannual variability of the Arctic sea ice: A comparison between AO-FVCOM and observations // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. № 11. P. 8320–8350.

Interannual Variability of Ice Cover and Primary Production in the Kara Sea

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

The study of interannual variability of total primary production (PP), open water area and surface water temperature in the Kara Sea was performed by the model and satellite observations in 2002 – 2016. The reliable positive trends in change of surface water temperature were registered in all Kara Sea regions ($R^2 = 0.37–0.61$, $p < 0.05$). The trends in interannual variability of open water area were reliable only in the Enisey estuary. The trends in increase of total PP were reliable in the Northern region and in the Enisey estuary. In the entire Kara Sea ice cover declined by 1% per year on average. The total PP minimum and maximum were registered in 2003 and 2011, respectively. During the study period Kara Sea PP increased by 2% per year on average. The most rapid enhance in PP was signed in spring (April–May). In general, increase in annual PP occurs due to increase in open water area rather than in area normalized primary production that decreased during study period in the Kara Sea. The significant regional differences in interannual variability of total PP were registered in the Kara Sea during study period.