

Пространственная изменчивость первичной продукции и продукционное районирование Карского моря по данным сканера MODIS-Aqua

А. Б. Демидов, С. В. Шеберстов, В. И. Гагарин

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: demspa@rambler.ru*

Пространственная изменчивость первичной продукции в столбе воды (ИПП) и продукционное районирование Карского моря выполнены впервые с использованием региональных моделей, разработанных и верифицированных на основе базы данных, созданной по материалам экспедиций в Карское море в конце августа – начале октября, и спутниковых данных MODIS-Aqua. Придерживаясь описательной концепции и частного подхода, мы выделили шесть продукционных районов, отличающихся по средним многолетним (2002–2015) значениям ИПП: Эстуарный район (эстуарии Оби и Енисея) со среднегодовым значением солёности на поверхности ≤ 10 psu; Внутренний (<100 м) и Внешний (100–200 м) шельфы, круглый год находящиеся под влиянием речного стока; Юго-западный район, на который это влияние распространяется в значительно меньшей степени; Северо-западный (жёлоб Св. Анны) и Северо-восточный (жёлоб Воронина) районы с прилегающими акваториям. Средние многолетние значения ИПП в этих районах находятся в диапазоне от 109 до 264 мгС/м² в год, что соответствует мезотрофному уровню. В областях, находящихся под влиянием речного стока, прослежена широтная зональность ИПП, а в северных районах моря — меридиональная.

Ключевые слова: первичная продукция, хлорофилл, пространственная изменчивость, дистанционное зондирование, районирование

Одобрена к печати: 29.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-153-162

Введение

Фитопланктон и его продукционные характеристики — основные структурно-функциональные компоненты океанических экосистем. Являясь начальными звеньями пищевой цепи, они отвечают за трансформацию вещества и энергии и за их передачу к высшим трофическим уровням (рыбы, морские млекопитающие, донные организмы), определяя в конечном счёте уровень продуктивности морских экосистем (Виноградов, 2008). Другим важным аспектом является участие фитопланктона, создающего интегральную первичную продукцию в столбе воды (ИПП), в биогеохимическом цикле углерода, изменчивость компонентов которого влияет на обмен углекислого газа между океаном и атмосферой, определяя вариабельность климата (Fay, McKinley, 2013). Третий аспект связан с транспортом взвешенного органического вещества из верхних слоёв океана на глубины и захоронение его на дне (Лисицин, 2014). Интенсивность этих процессов во многом определяется уровнем первичного продуцирования.

Несмотря на важность оценки состояния фитопланктонных сообществ и уровня ИПП, решение этих проблем находится на невысокой стадии развития. Одной из причин является слабая изученность пространственной изменчивости продукционных показателей фитопланктона в открытых районах Мирового океана. Это утверждение особенно применимо к Арктическому океану, где пополнение базы данных с помощью контактных методов, применяемых в экспедиционных исследованиях, и автономных платформ сильно ограничено из-за сложных климатических условий и логистических проблем. Напротив, оптические характеристики приповерхностного слоя океана, которые доступны благодаря введению в практику океанологических исследований методов дистанционного зондирования со спутников, позволяют изучать изменчивость ИПП с высоким пространственно-временным разрешением

(Carder et al., 2004). Использование спутниковых данных в настоящее время — одна из немногих возможностей для исследования распределения ИПП в Арктике.

Одним из подходов при оценке ИПП и исследовании её изменчивости является разработка продукционных моделей и введение в эти модели спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое (Хл) и фотосинтетически активной радиации (ФАР). Недавно такая работа была проведена для Карского моря — региона, ИПП которого интенсивно исследуется в последнее десятилетие (Демидов и др., 2017; Demidov et al., 2014, 2017). Цель настоящего исследования заключалась, во-первых, в получении картины пространственной изменчивости ИПП в Карском море по данным сканера цвета океана MODIS-Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за период с 2002 по 2015 г. и выяснении причин полученного распределения ИПП, а во-вторых, в проведении продукционного районирования Карского моря по этим данным.

Материал и методы

Региональные модели первичной продукции и хлорофилла

Данные, по которым проводилось исследование пространственной изменчивости ИПП фитопланктона, были получены 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 (Demidov et al., 2017). В региональном алгоритме ИПП Карского моря в качестве коэффициентов использованы средние для всей акватории величины эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды (ψ) и показателя вертикального распределения хлорофилла (k). Входящими в модель параметрами являются концентрация Хл и дневная приходящая ФАР.

$$\text{ИПП} = 8,27 \cdot \text{Хл} \cdot I_0, \quad (1)$$

где ИПП — первичная продукция в столбе воды, мгС/м² в день; 8,27 — среднее для Карского моря произведение $k \cdot \psi$; Хл — концентрация хлорофилла *a* на поверхности, мг/м³; I_0 — подповерхностная облучённость в диапазоне ФАР.

Использование средних продукционных показателей (например, ассимиляционного числа и эффективности фотосинтеза) в эмпирических моделях ИПП является одним из подходов к оценке годовой величины первичной продукции (Longhurst et al., 1995). В то же время следует ожидать, что произведение $k \cdot \psi$ изменчиво в пространстве и во времени. Одним из показателей, влияющих на его величину, является концентрация Хл, которая в Карском море имеет генеральную тенденцию к уменьшению от эстуариев в открытые районы. Нами получена степенная зависимость между произведением $k \cdot \psi$ и Хл: $k \cdot \psi = 15,36 \cdot \text{Хл}^{-0,684}$ ($R^2 = 0,67$; $N = 148$). Тем не менее введение этого уравнения в модель не улучшило её эффективность. При верификации RMSD для летнего и осеннего периода оказалась равной 0,51 и 0,40 соответственно, в то время как расчёт по формуле (1) дал величину 0,30 (Demidov et al., 2017).

Известно, что использующийся универсальный алгоритм MODIS OC3Mv6, а также адаптированные для Арктического океана алгоритмы OC4L и OC4P дают большую ошибку в определении концентрации Хл в водах второго оптического типа (Case II), к которым относятся значительные площади его акватории и, в частности, Карское море (Lewis et al., 2016). Для того чтобы уменьшить эту ошибку при определении первичной продукции, мы использовали региональный алгоритм расчёта Хл, результаты разработки которого изложены в предыдущей работе (Кузнецова и др., 2013), где наилучшая корреляция измеренных и расчётных величин Хл ($R^2 = 0,47$; $N = 185$) была получена при использовании отношения спектральных коэффициентов яркости моря (R_{rs}) на длинах волн 531 и 547 нм:

$$\ln(\text{Хл}) = -3,66 \cdot \ln \left(\frac{R_{rs}(531)}{R_{rs}(547)} \right) + 0,116.$$

Спутниковые данные

Данные сканера цвета MODIS-Aqua L2 уровня в период с 2002 по 2015 г. получены с сайта NASA (www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/) и обработаны с помощью программного обеспечения, разработанного в ИО РАН (Sheberstov, Lukyanova, 2007). Значения $R_{rs}(\lambda_i)$ были перечислены в величины концентрации хлорофилла на поверхности по региональному алгоритму (Кузнецова и др., 2013). Величины первичной продукции осреднялись за каждый день, доступный для сканирования в отсутствии облаков и льда.

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

Районирование

Границы Карского моря были определены исходя из предыдущих работ по оценке ИПП Арктического океана (Hill et al., 2013). При выделении продукционных районов Карского моря мы придерживались описательной концепции (Блануца, 1993) и использовали так называемый частный подход (Баканов, 1990). Согласно этому подходу районирование проводится по одному признаку и ставит своей целью решение узкоспециализированной задачи. Мы использовали средние многолетние (2002–2015) величины ИПП, рассчитанные по регионально адаптированной модели, с данными MODIS-Aqua по Хл и ФАР в качестве входящих параметров. Распределение среднемноголетних величин этих показателей можно видеть на рис. 1 и 2 (см. с. 156).

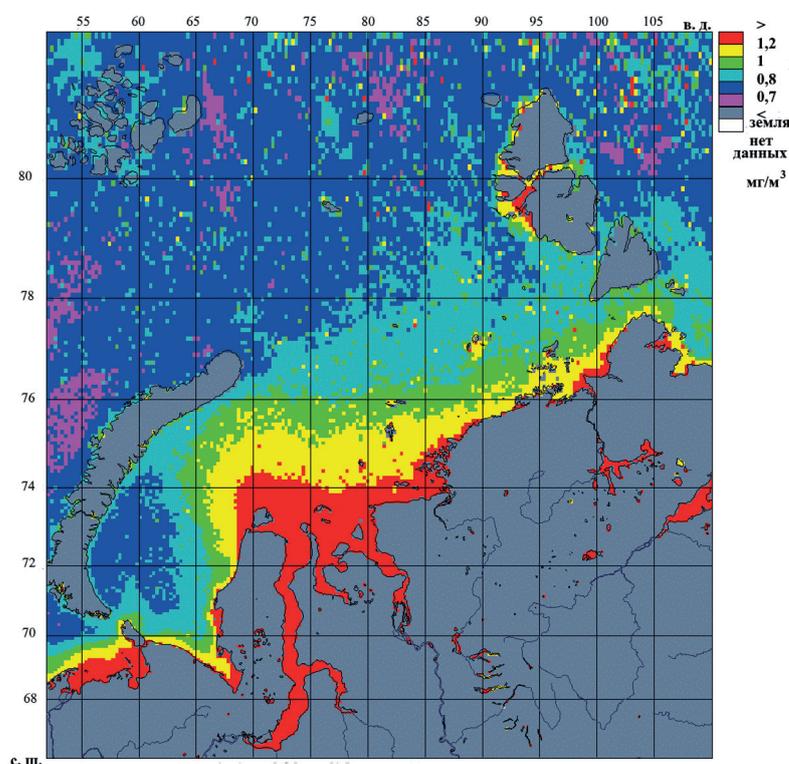


Рис. 1. Распределение среднемноголетних (2002–2015) величин концентрации хлорофилла a ($\text{мг}/\text{м}^3$) в Карском море

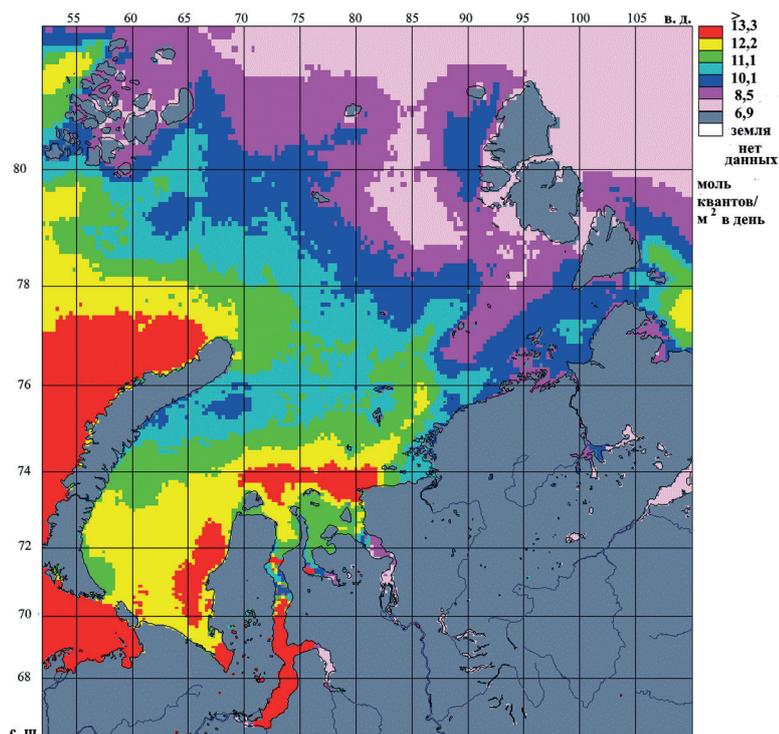


Рис. 2. Распределение среднееголетних (2002–2015) величин фотосинтетически активной радиации (моль квантов/м² в день) в Карском море

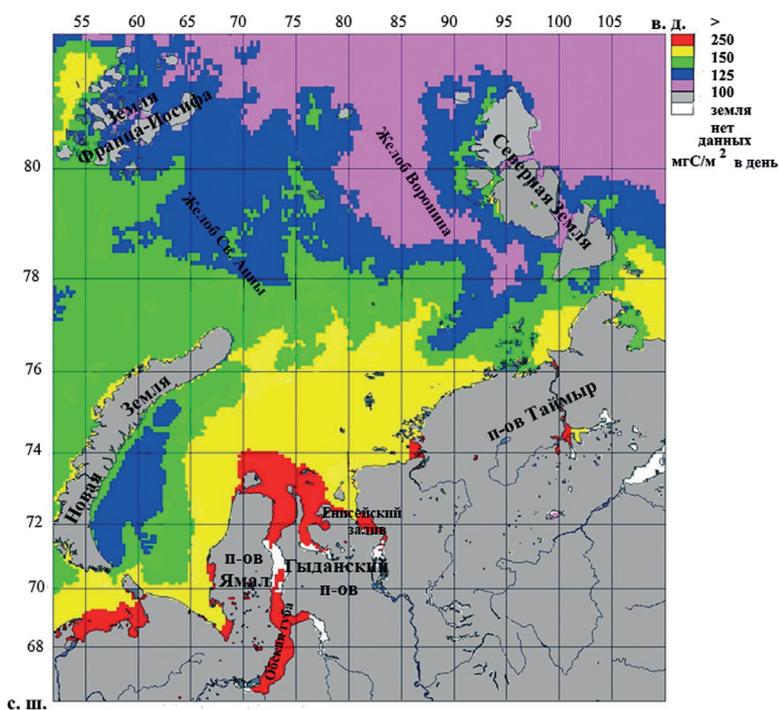


Рис. 3. Распределение среднееголетних (2002–2015) величин первичной продукции в столбе воды (мгС/м² в день) в Карском море

По этим данным была построена карта пространственного распределения ИПП в Карском море (рис. 3). Продукционные районы были выделены по принципу соответствия средних многолетних величин ИПП эстуариям Оби и Енисея, шельфовым районам (<200 м), желобам Св. Анны и Воронина и юго-западному району моря.

Результаты

Для ИПП Карского моря характерно убывание от эстуариев рек в северном и западном направлении (см. *рис. 3*). Максимальные ($>250 \text{ мгС/м}^2$ в день) среднемноголетние величины ИПП зарегистрированы в эстуариях Оби и Енисея и на прилегающем шельфе. На шельфе с глубинами $<100 \text{ м}$ значения ИПП находятся в диапазоне от 150 до 250 мгС/м^2 в день. Далее, в направлении на север на внешнем шельфе с глубинами 100–200 м ИПП продолжает снижаться до величин $125\text{--}150 \text{ мгС/м}^2$ в день. Юго-запад моря занимают воды со среднемноголетними значениями ИПП от 100 до 150 мгС/м^2 в день. Районы севернее 78° с. ш. характеризуются в основном значениями ИПП $<125 \text{ мгС/м}^2$ в день.

Опираясь на построенную карту продуктивности Карского моря (см. *рис. 3*), мы выделили шесть продукционных районов (*рис. 4*), средние многолетние величины Хл, ФАР и ИПП для которых приведены в *таблице*. Эстуарный район (1) занимает акватории Обской губы и Енисейского залива и прилежащие к ним зоны моря между островами Белый на западе и Сибирякова на востоке. Для этих районов характерны среднегодовые значения солёности на поверхности $\leq 10 \text{ psu}$. Внутренний (2) и Внешний (3) шельфы занимают акватории моря с глубинами в основном $<100 \text{ м}$ и от 100 до 200 м соответственно (см. *рис. 4*). Эти участки круглый год находятся под воздействием речного стока. Юго-западный район (4) выделен нами на основании экспедиционных данных, которые показывают незначительное, как правило, влияние речного стока на продукционные параметры фитопланктона и их вертикальное распределение (Demidov et al., 2014, 2018). Морфометрической основой рельефа северо-западного (5) и северо-восточного (6) районов являются соответственно желоба Св. Анны и Воронина. В состав этих районов мы включили и прилегающие акватории, которые отличаются по среднемноголетним значениям ИПП (см. *рис. 3*).

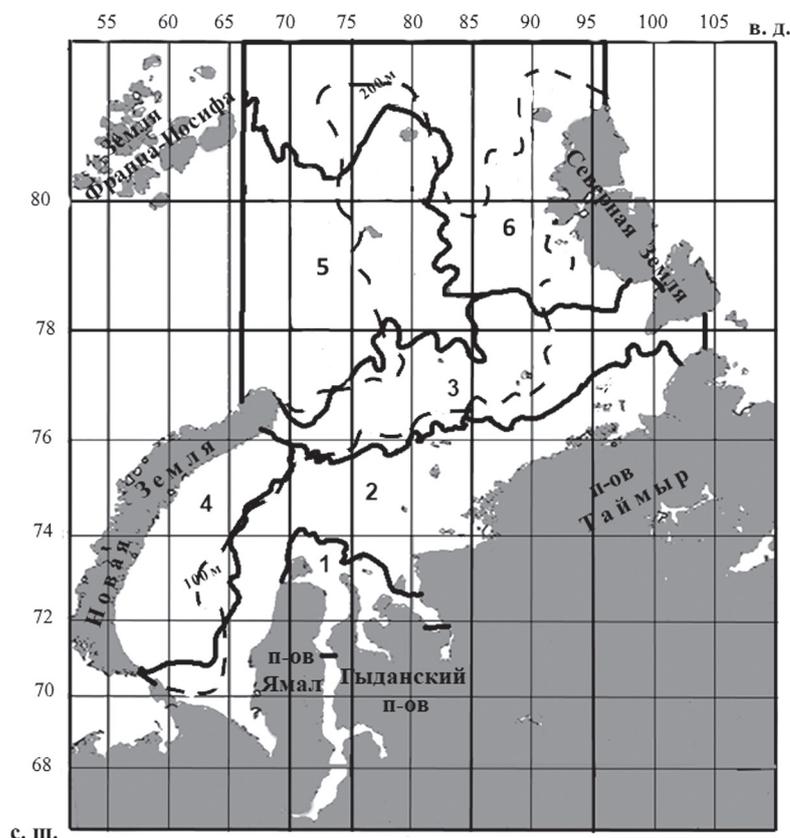


Рис. 4. Продукционные районы Карского моря: 1 — Эстуарный; 2 — Внутренний шельф ($<100 \text{ м}$); 3 — Внешний шельф (100–200 м); 4 — Юго-Западный; 5 — Северо-Западный; 6 — Северо-Восточный. Пунктиром показано генерализованное положение изобат 100 и 200 м

Средние многолетние (2002–2015) величины концентрации хлорофилла *a* на поверхности, фотосинтетически активной радиации и первичной продукции в столбе воды в продукционных районах Карского моря

Район	эстуарный	внутренний шельф (<100 м)	внешний шельф (100–200 м)	юго-западный	северо-западный	северо-восточный
Хл	$\frac{1,47 \pm 0,29}{477}$	$\frac{1,05 \pm 0,26}{566}$	$\frac{0,81 \pm 0,22}{484}$	$\frac{0,81 \pm 0,20}{508}$	$\frac{0,79 \pm 0,26}{477}$	$\frac{0,76 \pm 0,22}{403}$
ФАР	$\frac{13,2 \pm 9,1}{389}$	$\frac{13,1 \pm 9,1}{434}$	$\frac{12,7 \pm 9,4}{433}$	$\frac{14,5 \pm 10,3}{449}$	$\frac{12,7 \pm 9,1}{475}$	$\frac{10,9 \pm 8,9}{341}$
ИПП	$\frac{264 \pm 146}{317}$	$\frac{180 \pm 120}{413}$	$\frac{144 \pm 89}{354}$	$\frac{140 \pm 84}{406}$	$\frac{130 \pm 78}{374}$	$\frac{109 \pm 65}{256}$

Примечание: в числителе — средняя арифметическая величина и стандартное отклонение, в знаменателе — количество дней, доступных для сканирования спутником, по которым рассчитывалась средняя величина.

Достоверность разницы среднемноголетних величин ИПП (см. таблицу) была проверена для граничащих между собой районов по *t*-критерию Стьюдента. Все районы достоверно отличались при $p = 0,001$. Исключение составили соседние юго-западный район и внешний шельф. Несмотря на недостоверные отличия среднемноголетней величины ИПП в этих районах, мы считаем правомерным выделение юго-западных акваторий Карского моря в отдельный район, исходя из приведённых выше соображений, а также особенностей его батиметрии, в частности наличия Новоземельской впадины с глубинами >300 м.

Обсуждение результатов

Пространственная изменчивость первичной продукции Карского моря определяется в основном воздействием речного стока. Ранее была получена обратная зависимость содержания хлорофилла на поверхности и ИПП от поверхностной солёности (Demidov et al., 2014). Такое распределение продукционных показателей находится в соответствии с представлениями об Арктическом океане как глобальном эстуарии (Cloern, Jassby, 2008).

Влияние речного стока на минеральное питание фитопланктона Карского моря противоречиво. С одной стороны, Обь и Енисей являются источником биогенных элементов для роста и фотосинтеза фитопланктона в эстуариях и прилегающих к ним районах Карского моря. Несмотря на то что повышенные величины ИПП зарегистрированы также в линзах опреснённой воды, которые могут встречаться за пределами этих акваторий (Kubryakov et al., 2016), влияние рек на минеральное питание фитопланктона локально. В основном биогенные элементы потребляются в пределах эстуариев и на эстуарных фронтах, способствуя повышению ИПП до величин >250 мгС/м² в день (см. рис. 3). Другой причиной таких значений ИПП в этих районах является так называемая продукция аутвеллинга, когда реки выносят неизрасходованное в эстуариях органическое вещество, в том числе фитопланктон, в прилежащие районы моря (Winter et al., 1996). С другой стороны, реки не могут быть основным источником биогенов, на которых создаётся первичная продукция Карского моря. Таким источником являются глубинные воды. Речной сток способствует резкой стратификации вод внутреннего и внешнего шельфа. По-видимому, такая картина сохраняется круглый год. В связи с этим глубинные воды изолированы резким пикноклином, что затрудняет поступление минеральных солей в эвфотическую зону в результате конвективного перемешивания.

Другой причиной, вызывающей пространственную изменчивость среднемноголетних величин ИПП, является время освобождения различных районов моря ото льда. Упрощённо можно сказать, что в пределах года генеральное направление освобождения акватории Карского моря ото льда — с юго-запада на северо-восток, а замерзает море в обратном направлении (Егоров, 2006). Это приводит к тому, что южные районы моря больше по времени открыты для приходящей ФАР и в целом их продуктивность выше, что отражено на рис. 3.

Также на *рис. 3* и в *таблице* видно, что ИПП северо-западного района в 1,2 раза выше, чем северо-восточного. Известно, что по желобам Св. Анны и Воронина в Карское море поступают баренцевоморские воды, обогащённые биогенными элементами (Lien, Trofimov, 2013). Таким образом, влияние атлантических и, в частности, баренцевоморских вод как их модификации теоретически должно ослабевать в направлении с запада на восток, что приводит к меридиональной зональности продуктивности районов Арктического океана, слабо подверженных речному стоку (например (Hill et al., 2013)).

Заключение

По среднемноголетним (2002–2015) данным первичная продукция Карского моря соответствует мезотрофному уровню ($100\text{--}500\text{ мгС/м}^2$ в день) (Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977), причём ИПП основной части его акватории находится у нижнего предела этого диапазона. Причины невысокой первичной продуктивности Карского моря обсуждались неоднократно. Обзор литературы по этому вопросу можно найти в статье (Демидов и др., 2017). В настоящей работе приведено обобщение многолетних данных по ИПП Карского моря, полученных с помощью модельных расчётов и спутниковой информации. Совершенствование наших представлений об уровне первичной продукции Карского моря будет основано на накоплении новых экспедиционных данных, главным образом весной и ранним летом, уточнении сезонного цикла ИПП и применении сезонно адаптированных продукционных моделей.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0149-2018-0035 при поддержке РФФИ (проект № 18-05-60069). Экспедиционные работы проведены при поддержке РФФ (проект № 14-50-00095, направление «Экосистемы стратегически важных для Российской Федерации морских регионов»). Обработка спутниковых данных выполнена при поддержке РФФ (проект № 14-50-00095, направление «Взаимодействие физических, биологических и геологических процессов в береговой зоне, прибрежных акваториях и внутренних морях»).

Литература

1. *Баканов А. И.* Основы физико-географического районирования // Экологическое районирование пресноводных водоемов. Рыбинск: ИБВВ АН СССР, 1990. С. 16–41.
2. *Блануца В. И.* Интегральное экологическое районирование: концепция и методы. Новосибирск: Наука, 1993. 158 с.
3. *Виноградов М. Е.* Развитие пелагических сообществ и биотический баланс океана // Океанология на старте XXI века / ред. Верещака А. Л. М.: Наука, 2008. С. 257–292.
4. *Демидов А. Б., Шеберстов С. В., Гагарин В. И., Хлебонашев П. В.* Сезонная изменчивость первичной продукции фитопланктона Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 103–117.
5. *Егоров А. Г.* Особенности сезонных и межгодовых изменений состояния ледяного покрова Карского моря // Ледяные образования морей западной Арктики / ред. Зубаткин Г. К. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 26–46.
6. *Кобленц-Мишке О. И., Ведерников В. И.* Первичная продукция // Биология океана. Т. 2: Биологическая продуктивность океана. М.: Наука, 1977. С. 183–209.
7. *Кузнецова О. А., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Буренков В. И., Мошаров С. А., Демидов А. Б.* Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-AQUA // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21–31.
8. *Лисицин А. П.* Рассеянный осадочный материал биосферы морей и океанов // Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / ред. Нигматулин Р. И., Лобковский Л. И. М.: Науч. мир, 2014. С. 424–464.
9. *Carder K. L., Chen F. R., Cannizzaro J. P., Campbell J. W., Mitchell B. G.* Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a // Advances in Space Research. 2004. V. 33. P. 1152–1159.

10. Cloern J. E., Jassby A. D. Complex seasonal patterns of primary producers at the land-sea interface // Ecology Letters. 2008. V. 11. P. 1294–1303.
11. 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. Marine Systems. 2014. V. 132. P. 130–149.
12. Demidov A. B., Kopelevich O. V., Mosharov S. A., Sheberstov S. V., Vazyulya S. V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms // J. Sea Research. 2017. V. 125. P. 1–17.
13. Demidov A. B., Gagarin V. I., Vorobieva O. V., Makkaveev P. N., Artemiev V. A., Khrapko A. N., Grigoriev A. V., Sheberstov S. V. Spatial and vertical variability of primary production in the Kara Sea in July and August 2016: The influence of the river plume and subsurface chlorophyll maxima // Polar Biology. 2018. V. 41. No. 3. P. 563–578. DOI: 10.1007/s00300-017-2217-x.
14. Fay A. R., McKinley G. A. Global trends in surface ocean pCO₂ from in situ data // Global Biogeochemical Cycles. 2013. V. 27. P. 541–557.
15. 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 Asia-Pacific Remote Sensing. 2012. V. 8525. 12 p. URL: <https://doi.org/10.1117/12.981264>.
16. Hill V. J., Matrai P. A., Olson E., Suttles S., Steele M., Codispoti L. A., Zimmerman R. C. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates // Progress in Oceanography. 2013. V. 110. P. 107–125.
17. Kubryakov A., Stanichny S., Zatsepin A. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 176. P. 177–187.
18. 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 Research. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2016. V. 130. P. 14–27.
19. Longhurst A., Sathyendranath S., Platt T., Caverhill C. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data // J. Plankton Research. 1995. V. 17. P. 1245–1271.
20. Sheberstov S. V., Lukyanova E. A. A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field biooptical data // 4th Intern. Conf. “Current problems in optics of natural waters”: Proc. Conf. Nizhny Novgorod, 2007. P. 179–183.
21. Winter P. E. D., Schlacher T. A., Baird D. Carbon flux between an estuary and the ocean: a case for outwelling // Hydrobiology. 1996. V. 337. P. 123–132.

Spatial variability of primary production and regionalization of the Kara Sea from MODIS-Aqua data

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

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: demspa@rambler.ru

For the first time spatial variability of water column primary production (IPP) and regionalization of the Kara Sea were performed using region-specific models and MODIS-Aqua data. Region-specific empirical IPP and chlorophyll algorithms were developed and verified based on field observations in autumn (predominantly in September and October). On the basis of multiyear (2002–2015) averaged data we assigned six productivity regions in the Kara Sea. Inherent property of Ob and Enisey estuaries is low (<10 psu) annual averaged surface salinity. Inner (<100 m) and Outer shelf (100–200 m) are influenced by river discharge year round. Alternatively, Southwestern region is under river discharge to a lesser degree. The Northwestern region and Northeastern region coincide with St. Anna trough and Voronin’s trough, respectively. Regionally averaged primary production values ranged from 109 to 264 mgC/m² per day that corresponds to mesotrophic level of IPP. Latitudinal and longitudinal zonality in IPP distribution was established in the Kara Sea river discharge region and northern region, respectively.

Keywords: primary production, chlorophyll, spatial variability, remote sensing, regionalization

Accepted: 29.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-153-162

References

1. Bakanov A. I., *Osnovy fiziko-geograficheskogo raionirovaniya (Fundamentals of physiographic zoning)*, In: *Ekologicheskoe raionirovanie presnovodnykh vodoemov (Ecological zoning of freshwater basins)*, Rybinsk: IBVV AN SSSR, 1990, pp. 16–41.
2. Blanutsa V. I., *Integral'noe ekologicheskoe raionirovanie: kontseptsiya i metody (Integral ecological regionalization: conception and methods)*, Novosibirsk: Nauka, 1993, 158 p.
3. Vinogradov M. E., *Razvitie pelagicheskikh soobshchestv i bioticheskii balans okeana (Evolution of pelagic communities and biotic balance of the ocean)*, In: *Okeanologiya na starte XXI veka (Oceanology at the start of XXI century)*, Vereshchaka A. L. (ed.), Moscow: Nauka, 2008, pp. 257–292.
4. Demidov A. B., Sheberstov S. V., Gagarin V. I., Khlebopashev P. V., *Sezonnaya izmenchivost' pervichnoi produktsii fitoplanktona Karskogo morya po sputnikovym dannym (Seasonal variation of Kara Sea phytoplankton primary production with satellite observations)*, *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 103–117.
5. Egorov A. G., *Osobennosti sezonnykh i mezhgodovykh izmenenii sostoyaniya ledovogo pokrova Karskogo morya (Features of seasonal and interannual changes in the ice cover of the Kara Sea)*, In: *Led zapadnykh arkticheskikh morei (Ice of Western Arctic Seas)*, Zubatkin G. K. (ed.), St. Petersburg: AANII, 2006, pp. 26–46.
6. Koblets-Mishke O. I., Vedernikov V. I., *Pervichnaya produktsiya (Primary production)*, In: *Biologiya okeana, T. 2: Biologicheskaya produktivnost' okeana (Biology of the ocean, Vol. 2: Biological productivity of the ocean)*, Moscow: Nauka, 1977, pp. 183–209.
7. Kuznetsova O. A., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Burenkov V. I., Mosharov S. A., Demidov A. B., *Otsenka kontsentratsii khlorofilla v Karskom more po dannym sputnikovogo skanera MODIS-AQUA (Estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea with MODIS-Aqua data)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 5, pp. 21–31.
8. Lisitsin A. P., *Rasseyanni osadochnyi material biosfery morei i okeanov (Scattered sediment material of seas and oceans)*, In: *Mirovoi ocean. T. 2. Fizika, khimiya i biologiya okeana. Osadkoobrazovanie v okeane i vzaimodeistvie geosfer Zemli (World Ocean. Vol. 2: Physics, chemistry and biology of the ocean. Sediment formation in the ocean and interaction of the Earth's geospheres)*, Nigmatulin R. I., Lobkovskii L. I. (eds.), Moscow: Nauchnyi mir, 2014, pp. 424–464.
9. Carder K. L., Chen F. R., Cannizzaro J. P., Campbell J. W., Mitchell B. G., *Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a*, *Advances in Space Research*, 2004, Vol. 33, pp. 1152–1159.
10. Cloern J. E., Jassby A. D., *Complex seasonal patterns of primary producers at the land-sea interface*, *Ecology Letters*, 2008, Vol. 11, pp. 1294–1303.
11. 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. Marine Systems*, 2014, Vol. 132, pp. 130–149.
12. Demidov A. B., Kopelevich O. V., Mosharov S. A., Sheberstov S. V., Vazyulya S. V., *Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms*, *J. Sea Research*, 2017, Vol. 125, pp. 1–17.
13. Demidov A. B., Gagarin V. I., Vorobieva O. V., Makkaveev P. N., Artemiev V. A., Khrapko A. N., Grigoriev A. V., Sheberstov S. V., *Spatial and vertical variability of primary production in the Kara Sea in July and August 2016: The influence of the river plume and subsurface chlorophyll maxima*, *Polar Biology*, 2018, Vol. 41, No. 3, pp. 563–578, DOI: 10.1007/s00300-017-2217-x.
14. Fay A. R., McKinley G. A., *Global trends in surface ocean pCO₂ from in situ data*, *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, Vol. 27, pp. 541–557.
15. 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 Asia-Pacific Remote Sensing*, 2012, Vol. 8525, 12 p., URL: <https://doi.org/10.1117/12.981264>.
16. Hill V. J., Matrai P. A., Olson E., Suttles S., Steele M., Codispoti L. A., Zimmerman R. C., *Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates*, *Progress in Oceanography*, 2013, Vol. 110, pp. 107–125.

17. Kubryakov A., Stanichny S., Zatsepin A., River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based Lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 177–187.
18. 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 Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, Vol. 130, pp. 14–27.
19. Longhurst A., Sathyendranath S., Platt T., Caverhill C., An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data, *J. Plankton Research*, 1995, Vol. 17, pp. 1245–1271.
20. Sheberstov S. V., Lukyanova E. A., A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field biooptical data, 4th Intern. Conf. “Current problems in optics of natural waters”, Proc. Conf., Nizhny Novgorod, 2007, pp. 179–183.
21. Winter P. E. D., Schlacher T. A., Baird D., Carbon flux between an estuary and the ocean: a case for outwelling, *Hydrobiology*, 1996, Vol. 337, pp. 123–132.