

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ КАРСКОГО МОРЯ

Демидов А.Б.

*Институт океанологии им П.П.Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский проспект д.36
тел.: (499) 1245996 факс: (499) 1245983 e-mail: demidov@rambler.ru*

The increase in the performance of the Kara Sea models depends on the input of the photophysiological phytoplankton characteristics and photosynthetically available radiation. The depth-resolved model performed slightly better than depth-integrated model. There was no sufficient decrease in predictive skill of both algorithms when MODIS-Aqua data were used as input variables. Thereby, the depth-integrated model can be recommended for annual Kara Sea primary production assessment and study of its long-term variability using satellite data.

Оценка годовых величин и изучение долговременных изменений интегральной первичной продукции (ИПП) океанов и морей подразумевает разработку моделей и использование спутниковых данных в качестве входных в эти модели параметров. Разработка и верификация алгоритмов ИПП, а также исследование продуктивности арктических морей (АМ) могут быть основаны на так называемых региональном и региональном подходах. При первом из них используются модели, их большое количество, созданные без учета специфики формирования первичной продукции (ПП) АМ. Региональный подход подразумевает использование баз экспериментальных данных для АМ и выявление характерных для этого региона взаимосвязей первичной продукции от абиотических и биотических факторов. Такой подход считается одним из основных путей улучшения моделей ИПП [1].

Карское море относится к водам, так называемого второго оптического типа (Case II), в которых применение регионально неадаптированных алгоритмов приводит к низкому соответствию модельных и натурных данных [2]. Поэтому, для таких акваторий разработка и верификация региональных моделей особенно актуальна.

Региональные алгоритмы первичной продукции Карского моря были разработаны по базе данных, созданной в 3-х осенних экспедициях (сентябрь-октябрь 1993, 2007 и 2011 гг.).

Интегрированная по глубине модель первичной продукции Карского моря (ИМ). Адаптированный для Карского моря алгоритм включает средние величины эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды ($\mu = \Delta \text{ACh}_z / I_0$) и индекс вертикального распределения хлорофилла «а» (X_L) ($k = X_{L_{\text{Ф}}} / X_{L_0}$) в качестве коэффициентов модели. Здесь, ΔACh_z – среднее ассимиляционное число в слое фотосинтеза, I_0 – подповерхностная облученность в диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР), $X_{L_{\text{Ф}}}$ – интегральное содержание Хл в слое фотосинтеза, X_{L_0} – концентрация Хл на поверхности. Входными параметрами являются величины X_{L_0} и дневной прироста ФАР. Эти показатели сравнительно легко определяются в полевых условиях. При таком подходе ИПП может быть рассчитана, как

$$\text{ИПП}_n = k \mu X_{L_0} I_0 \quad (1)$$

Так как распределение произведения $k \mu$ носит ярко выраженный логнормальный характер, целесообразно использование средней геометрической величины, которая при осреднении для всего моря равняется 8.27, следовательно, уравнение (1) принимает следующий вид

$$\text{ИПП}_n = 8.27 X_{L_0} I_0 \quad (2)$$

Модель первичной продукции Карского моря с разрешением по глубине (РГМ). Разработка РГМ основана на использовании максимального в слое фотосинтеза ассимиляционного числа (ACh_{max}), и вертикальных кривых АЧ и Хл. Дневная ИПП_н рассчитывается путем интегрирования по глубине

$$\text{ИПП}_n = \int_0^Z \text{ACh}_z X_{Lz} DL \, dz, \quad (3)$$

где АЧ_z и ХЛ_z – ассимиляционное число и концентрация Хл на глубине Z, соответственно, а DL – длительность светового дня.

Величины АЧ_z были рассчитаны по степенной зависимости АЧ_z от ФАР (I_z), выраженных в процентах от максимальных величин: АЧ_{max} и I_0 , соответственно:

$$\text{ACh}_{\text{opt}} = 11.65 I_z^{0.49}, \quad (4)$$

следовательно,

$$\text{ACh}_z = \text{ACh}_{\text{max}} (11.65 I_z^{0.49} / I_0). \quad (5)$$

Значения АЧ_{max} были получены с использованием эмпирической зависимости этого показателя от I_0 [3], где

$$\text{ACh}_{\text{max}} = 10^{-0.71 - 0.90 \log_{10} I_0}. \quad (6)$$

Путем подстановки АЧ_{max} из формулы (6) в выражение (5) получаем следующее уравнение:

$$\text{ACh}_z = (10^{-0.71 + 0.90 \log_{10} I_0}) ((11.65 I_z^{0.49}) / I_0). \quad (7)$$

Параметризация вертикальных профилей X_{L_0} была проведена для вод разных трофических уровней, выделенных по X_{L_0} :

I-я трофическая градация ($X_{L_0} = 0.1 - 0.5 \text{ мг/м}^3$);
в пределах эвфотического слоя (1% ФАР)

$$X_{L_2} = X_{L_0} ((K_d z) - 68.96)/105.2, \quad (8)$$

визе эвфотического слоя

$$X_{L_2} = X_{L_0} ((K_d z) - 7.47)/(-19.95), \quad (9)$$

II-я трофическая градация ($X_{L_0} = 0.5 - 1.0 \text{ мг/м}^3$)

$$X_{L_2} = X_{L_0} \exp(- (K_d z) + 0.08)/8.90, \quad (10)$$

III-я трофическая градация ($X_{L_0} = 1.0 - 2.0 \text{ мг/м}^3$)

$$X_{L_2} = X_{L_0} \exp(- (K_d z) - 0.05)/6.52, \quad (11)$$

IV-я трофическая градация ($X_{L_0} > 2.0 \text{ мг/м}^3$)

$$X_{L_2} = X_{L_0} ((K_d z) - 18.02)/(-20.20), \quad (12)$$

K_d – коэффициент диффузного ослабления исходящего излучения в литгазоне ФАР (м^{-1}).

Таким образом, становится возможным рассчитать ИПП в пределах каждой трофической градации вод, используя уравнение (3), подставив вместо A_{Ch} и X_L уравнения (7) и (8) – (12), соответственно. При таком подходе входными в модель параметрами являются X_{L_0} , I_0 и K_d .

Для верификации моделей были использованы данные, которые не применялись при их разработке, так называемая «независимая база данных» (лето и осень 2013–2015 гг.). Представляет интерес также исследование возможности применения разработанных в осенний период для Карского моря моделей в морях Арктики, сходных с ним по гидрофизическим, химическим и биологическим свойствам, например, в море Лаптёвых, а также в летний сезон. Следующим этапом является верификация моделей с использованием спутниковых данных. Результаты верификации региональных моделей ИПП Карского моря представлены в таблице.

При использовании натурных данных в качестве входных параметров РГМ завышает или занижает измеренные значения ИПП осенью приблизительно в 2 раза (средняя квадратическая ошибка регрессии (RMSD) – 0.29), а ИМ – в 2.5 раза (RMSD = 0.39). Летом эффективность ИМ снижалась в 1.5 раза (RMSD = 0.57), в то время как РГМ предсказывала значения ИПП практически с той же точностью (RMSD = 0.31). В море Лаптёвых в осенний период РГМ работала в 1.7 раза эффективнее ИМ (RMSD 0.24 и 0.41, соответственно). Введенные в модель спутниковых данных показали, что ИМ и РГМ работают приблизительно с одинаковой точностью (таблица).

Таким образом, можно рекомендовать интегрированную по глубине модель, как более простую в использовании и достаточно точную, для оценки годовых величин и исследования долговременной изменчивости ИПП как в Карском море, так и в морях Арктики, сходных с ним по гидролого-гидрохимическим условиям.

Таблица. Результаты регрессионного анализа связи $\log_{10} y = b + a \log_{10} x$ измеренных (ИПП_н – $\log x$) и рассчитанных с помощью моделей (ИПП_м – $\log y$) величин интегральной первичной продукции и показателя эффективности различных моделей

Модель	Сезон, регион и источник данных	b	a	R^2	RMSD	B	N
ИМ	Карское море, сентябрь–октябрь, <i>in situ</i>	0.19	0.77	0.51	0.39	-0.19	84
	Карское море, август, <i>in situ</i>	-	1.11	0.29	0.57	-0.29	41
	Море Лаптёвых, <i>in situ</i>	-	1.63	0.30	0.41	-0.21	14
	MODIS-Aqua	1.35	-	-	-	-	-
РГМ	Карское море, сентябрь–октябрь, <i>in situ</i>	1.02	0.42	0.22	0.30	-0.08	26
	Карское море, август, <i>in situ</i>	0.35	0.78	0.61	0.29	-	84
	Карское море, август, <i>in situ</i>	0.30	0.87	0.38	0.31	0.03	41
	Море Лаптёвых, <i>in situ</i>	-	1.16	0.24	0.24	-0.01	14
	MODIS-Aqua	0.36	-	-	-	-	-
	MODIS-Aqua	1.19	0.44	0.27	0.31	0.14	26

Примечание. a и b – коэффициенты в уравнении линейной регрессии; R^2 – коэффициент детерминации; RMSD – средняя квадратическая ошибка регрессии; B – средняя абсолютная погрешность; N – количество парных измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 16-05-00050).

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Lee Y.J., Matrai P.A., Friedrichs M.A.M. et al. An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in

stn. chlorophyll-*a* based models // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. doi:10.1002/2015JC111018.

3. Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaev 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.

УДК 579.68(268.45)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛИ АКТИВНОЙ ФРАКЦИИ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

Мошарова И.В.

Биологический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

119234, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, 8(495)939-10-00, improst@mail.ru

Results for application of a method for accounting of bacterial cells with active metabolism for marine ecosystems environmental monitoring have been presented. This method has been applied when researching the microbial population in estuarial, marine and freshwater ecosystems.

Бактериопланктон является одним из основных звеньев морских экосистем, отмеченном за фундаментальные процессы деструкции органического вещества, поэтому изучение его функционирования является важным направлением как фундаментальной науки, так и прикладной, в частности, экологического мониторинга морских экосистем.

К числу стандартных методов микробиологического мониторинга относятся: учет общей численности бактериопланктона (ОЧБ), определение численности отдельных физиологических групп бактерий, способных к росту на питательных средах [1, 2].

В конце XX века стало известно, что в морских и пресноводных водоемах значительное количество клеток в составе бактериопланктона является неактивным и лишь небольшая доля (в основном от 0,1 до 20% клеток от общей численности бактериопланктона) обладает активным метаболизмом [7–10]. И лишь в некоторых случаях доля активных кле-

ток бактериопланктона достигает 70%. Процессы реминерализации в водных экосистемах обеспечивает активно функционирующие бактерии (АФБ) в составе бактериоценоза. Предполагается, что количество АФБ является более вариabельным фактором, чем ОЧБ, и этот параметр в большей степени реагирует на изменения продуктивности водных экосистем [7–10].

Автором было проведено изучение влияния содержания хлорофилла *a* в воде на количество АФБ в эстуарных [3], шельфовых морских экосистемах, а также в глубоководных морских впадинах Карского моря [4]. Численность активно функционирующих бактерий учитывалась с помощью соли тетразолия – 5-шано 2,3-нитридил тетраэтилам хлорид (ЦТХ). Рабочий раствор ЦТХ готовили согласно [9]. В качестве меры продукционного потенциала водных экосистем была использована концентрация в воде основного фотосинтетического пигмента хлорофилла *a*.

Для оценки влияния продукционного потенциала водных экосистем на численность АФБ нами был проведен корреляционный анализ. В результате, по данным для 2011 г., были установлены значимые прямые корреляционные связи между количеством активных клеток в водах разреза вдоль эстуария р. Енисей, в этом случае численность активных клеток бактериопланктона также значимо коррелировала с содержанием в воде хлорофилла *a* ($R = 0.66$, $p < 0.001$) [3]. Палочные корреляционных зависимостей между этими параметрами в эстуарных и шельфовых морских экосистемах отмечалось ранее и другими авторами [7]. В то же время, для глубоководного района Карского моря – желоб Святой Анны – достоверная корреляционная связь между численностью активных бактерий и содержанием в воде хлорофилла *a* отсутствовала [4]. В связи с этим мы предполагаем, что в более продуктивных экосистемах (шельфовых, эстуарных) обилие активного бактериопланктона в значительной мере зависит от продукционного потенциала водоема, характерного содержания в водах хлорофилла *a*. В то же время в олиготрофных морских районах, в частности – водах желоба Св. Анны в Карском море, в которых обилие фитопланктона сравнительно невелико, бактериопланктон вынужденно перекладывается на другие источники органического вещества, не связанные напрямую с фитопланктоном.

Наши исследования в арктических морях [3, 4], а также в пресноводных экосистемах [5, 6] позволяют утверждать, что такой стандартный показатель, как ОЧБ, не может в полной мере характеризовать составные бактериопланктона, как редуцированного звена водных экосистем. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности и перспективности применения в научных исследованиях и в рамках экологического мониторинга морских экосистем метода учета численности