



УДК 519.8

© 2015 г. М.М. Ярусов,

А.И. Абакумов, д-р физ.-мат. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ БИОПРОДУКТИВНОСТИ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ)

Распределение хлорофилла в толще воды по глубине рассчитывается с помощью модифицированной модели, построенной с применением функции приспособленности. Модель использует спутниковые данные о поверхностном слое в Японском море. Получены модельные оценки биопродуктивности Японского моря в 2008 – 2012 гг.

Ключевые слова: математическая модель, хлорофилл, спутник, дистанционное зондирование, первичная продукция.

Введение

Первичная продукция водной экосистемы является оценкой ее биопродуктивности. Первичная продукция – это продукция фитопланктона в процессе фотосинтеза. Скорость продуцирования органического вещества зависит от состояния фитопланктона и внешней среды. Наиболее существенными факторами влияния являются питательные вещества и освещенность (*фотосинтетически активная радиация* – ФАР). Контролирующим фактором выступает температура воды [1 – 3]. Эти факторы положены в основу многих моделей жизнедеятельности фитопланктона [4], в том числе и с модельным описанием распределения фитопланктона по глубине [5 – 7]. Сюда же относятся наши модельные разработки о распределении фитопланктона в море по глубине [8, 9]. Зондирование морской поверхности искусственными спутниками Земли позволяет получать данные о температуре, освещенности и концентрации хлорофилла в поверхностном слое. Мы получили такие данные в Центре коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ИАПУ ДВО РАН [10], где проводятся исследования в том числе и биологических характеристик поверхности океана [11]. Интерпретация спутникового сигнала представлена числовыми массивами, в которых содержится информация о концентрациях хлорофилла «а», температуре и ФАР в поверхностном слое воды в среднем за каждый месяц 2008 – 2012 гг.

Предлагаемая модель позволяет восстанавливать распределение хлорофилла по глубине на основе спутниковых данных о поверхностном слое. Далее проводится расчет суточной первичной продукции по всей глубине фотического слоя, делаются оценки годовой первичной продукции отдельных районов моря и всего моря в целом.

Математическая модель

Применяется модель, полученная из модели распределения фитопланктона по глубине с применением концепции функции приспособленности [9]. Модель распределения фитопланктона по глубине [8] описывает основные механизмы жизнедеятельности фитопланктона в неподвижном вертикальном одномерном столбе воды. Перемещение фитопланктона осуществляется под воздействием микротурбулентной диффузии [12]. Уравнения модели отражают динамику биомассы фитопланктона $y(t,x)$ в зависимости от минерального питания $z(t,x)$, ФАР – $I(t,x)$ и температуры водной среды $\theta(t,x)$. Эти величины зависят от момента времени t , измеряемого в сутках, и глубины x , измеряемой в метрах. Удельная скорость $\alpha(y,z)$ ослабления освещенности линейно учитывает воздействие общей мутности воды и затенение планктоном, минеральными веществами:

$$\alpha(y,z) = \alpha_0 + \alpha_1 y + \alpha_2 z.$$

На базе этой модели была построена модель, основанная на оптимизации функции приспособленности и гипотезе об обратном влиянии плотности биомассы фитопланктона на концентрацию минеральных веществ [9]. Предполагая стремление фитопланктонного сообщества занять максимально благоприятную нишу для жизнедеятельности, вводим функцию приспособленности, совпадающую в данном случае с удельной скоростью роста. Такая стратегия моделирования имеет то основание, что функция удельной скорости роста может быть интерпретирована как скорость роста сообщества. Аналогичные функции известны в теории динамических моделей сообществ с учетом генетических структур [13]. Затухание светового потока будем считать сообразным последнему уравнению модели [8]. Будем придерживаться гипотезы об обратном влиянии фитопланктона на величину пищевого стимула в процессе фотосинтеза. Модель из работы [9] модифицирована нами изменениями (2), (3) функций в коэффициенте удельной скорости роста. Исследование модели [9] показало, что необходимо учесть также удельную скорость $e(y)$ элиминации хлорофилла из системы. В результате модель приобрела вид:

$$\frac{dy}{dx} = \left[\frac{d\mu}{dx} - e(y) \right] y, \quad \frac{dz}{dx} = \nu p(y, y_0) z, \quad \frac{dI}{dx} = -\alpha(y, z) I. \quad (1)$$

Функция p описывает обратное влияние фитопланктона на пищевой стимул z . Эта функция убывает по переменной y , мы выбираем ее в виде $p(y, y_0) = \frac{y_0}{y + y_0}$ классической зависимости Михаэлиса-Ментен [14]. В этой модификации модели минеральное питание заменено понятием «пищевой стимул». Пищевой стимул ведет себя подобно плотности минеральных веществ, но является нормированной

характеристикой, поскольку спутниковые данные не имеют сведений о концентрациях минеральных веществ.

Функция μ описывает удельную скорость роста биомассы фитопланктона, основанную на гипотезе о независимости выделенных влияющих факторов. Она имеет вид:

$$\mu(z, I, \theta) = \mu_0 \cdot \mu_\theta(\theta) \cdot \min\{\mu_z(z), \mu_I(I)\}. \quad (2)$$

Здесь $\mu_z(z) = \frac{z}{(z_0 + z)}$ – зависимость удельной скорости роста биомассы фитопланктона от плотности минеральных веществ [14], $\mu_I(I) = \frac{I}{(I_0 + I)}$ – зависимость удельной скорости роста от освещенности, и ее зависимость от температуры среды

$$\mu_\theta(\theta) = e^{k_\theta \frac{\theta - \theta_{opt}}{\Delta\theta}}, \quad (3)$$

в которой происходит воспроизводство растительных организмов [1, 7, 15, 16]. Функция $e(y)$ выражает скорость элиминации фитопланктона и в простейшем случае имеет вид: $e(y) = e_0$. Параметры z_0 и I_0 – это константы полунасыщения по минеральному питанию и освещенности соответственно; θ_{opt} имеет смысл оптимальной для фитопланктона температуры; $\Delta\theta$ характеризует температурный шаг влияния на удельную скорость роста.

Данные для расчетов

Для учета биогеографической дифференциации Японского моря введем функцию

$$\varphi(x; x_1, x_2, y_1, y_2) = y_1 + (y_2 - y_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

и переменную

$$\eta = \lambda - \zeta,$$

где λ и ζ – долгота и широта исследуемой точки в Японском море. Основным направлением изменения условий обитания считаем направление с северо-запада на юго-восток [17]. Пусть $T = 365$ – полный год в сутках.

Для описания распределения температур используем качественное описание физико-географических условий Японского моря, почерпнутых из монографии [17]. В зависимости от сезона придонная температура на северо-западе моря несколько различается, а на юго-востоке – практически нет. Поэтому рассмотрим следующую функцию:

$$\psi(t, \eta; \eta_1, \eta_2, a, b, c) = \varphi(\eta; \eta_1, \eta_2, \varphi(\min\{t, \frac{5}{3}(T-t)\}; 0, \frac{5}{8}T, a, b), c),$$

у которой значение функции при $\eta = \eta_1$ равно a зимой и b – летом, если $\eta = \eta_2$, то значение функции равно c . Данная функция имеет максимум по t при $t = 5T/8$, что соответствует середине августа (принято, что в Японском море это середина лета).

Обозначим температуру на глубине $\bar{x} = 100$ м через θ_b и определим ее сле-

дующим образом:

$$\theta_b(t, \eta) = \psi(t, \eta; \eta_1, \eta_2, 0, 2, 8) \quad (4)$$

для $t \in [0, T]$. Величина η_1 соответствует северо-западной точке (наименьшее возможное значение η), а η_2 – юго-восточной (наибольшее возможное значение η). Здесь и ниже учтено, что пик летних температур приходится на август:

$$\theta(t, x) = \begin{cases} \theta_0(t), & 0 \leq x \leq x_1^\theta(t, \eta) \\ \varphi(x; x_1^\theta(t, \eta), x_2^\theta(t, \eta), \theta_0(t), \theta_b), & x_1^\theta(t, \eta) \leq x \leq x_2^\theta(t, \eta), \\ \theta_b, & x_2^\theta(t, \eta) \leq x \leq \bar{x} \end{cases} \quad (5)$$

где $\theta_0(t)$ – температура на поверхности; границы изменения температуры по глубине описываются следующими функциями:

$$x_1^\theta(t, \eta) = \psi(t, \eta; \eta_1, \eta_2, 0, 15, 0); \quad x_2^\theta(t, \eta) = \psi(t, \eta; \eta_1, \eta_2, 100, 50, 100).$$

Эти формулы означают создание слоя скачка температур по глубине (термоклина) летом и более плавное ее изменение по глубине в другие сезоны. Формула $\theta_{opt}(\eta) = \varphi(\eta; \eta_1, \eta_2, 5, 15)$ указывает на изменение оптимальной температуры для обитающих видов от северо-запада к юго-востоку от 5°C до 15°C .

Расчет первичной продукции

Следуя устоявшейся методе [15], вычисляем первичную продукцию P в единице объема воды по формуле

$$P = B \times P^B, \quad (6)$$

где B – концентрация хлорофилла; P^B – удельная продукция на единицу массы хлорофилла (ассимиляционная функция). Для вычисления P^B используем зависимость Платта [7, 15], а данные работы [16] – для уточнения параметров ассимиляционной функции, которая принимает следующий вид:

$$P^B(t, z, \theta, I) = \chi(t) P_m^B(z, \theta) \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha^B(z, \theta) I}{P_m^B(z, \theta)}\right) \right], \quad (7)$$

где $\chi(t)$ – продолжительность светового дня в часах; $P_m^B(z, \theta) = P_r^B \cdot \mu_z(z) \cdot \mu_\theta(\theta)$, $\alpha^B(z, \theta) = \alpha_r^B \cdot \mu_z(z) \cdot \mu_\theta(\theta)$.

В табл. 1 приведены численные значения основных параметров. Единицы измерения связаны с производством продукции в граммах углерода (гС) на единицу массы хлорофилла «а» (гХла) в час и измерением освещенности в эйнштейнах (или молях фотонов, Е) на единицу площади (м^2) в сутки.

Таким образом, мы определили функцию изменения температуры по глубине в зависимости от сезона и географического местоположения наблюдаемой зоны Японского моря. Значения прочих параметров системы взяты в соответствии с [4, 5, 15, 16]. Начальное значение величины пищевого стимула $z(0) = I$.

Помимо изменения средней динамики показателей первичного продуцирования в течение годового цикла модель (1) позволяет построить оценки суммарной годовой продукции на всей акватории, доступной спутниковому наблюдению.

Таблица 1

Обозначение	Название	Единица измерения	Численное значение
y_0	Константа полунасыщения для хлорофилла	г/м ³	3,1
v	Максимальная удельная скорость роста концентрации минеральных веществ	сут ⁻¹	0,03
z_0	Константа полунасыщения для минеральных веществ	г/м ³	4,0
e_0	Удельная скорость элиминации хлорофилла	сут ⁻¹	0,023
I_0	Константа полунасыщения для освещенности	Е м ⁻² сут ⁻¹	60
k_0	Удельная скорость затухания освещенности	сут ⁻¹	0,045
k_1	Удельная скорость затухания освещенности из-за хлорофилла	сут ⁻¹	0,018
k_2	Удельная скорость затухания освещенности из-за минеральных веществ	сут ⁻¹	0,01
k_θ	Зависимость удельной скорости роста массы хлорофилла от температуры	---	0,7
$\Delta\theta$	Стандартный шаг по температуре	°С	10,0
P_r^B	Максимальное значение ассимиляционной функции	гС (гХла) ⁻¹ час ⁻¹	0,8400
α_r^B	Максимальное значение функции $\alpha^B(z, \theta)$	гС (гХла) ⁻¹ час ⁻¹ · (Е м ⁻² сут ⁻¹) ⁻¹	0,08854

Основные результаты

По модели (1) при указанных выше характеристиках и функциях рассчитана суточная и годовая продукция фитопланктона в Японском море в 2008 – 2012 гг. На рис. 1 показано распределение суточной продукции под 1 м² по поверхности Японского моря в среднем за четыре месяца 2011 г.

В табл. 2 приведена суточная продукция под единицей площади (гС/ (м²сут)) в среднем за месяц и суммарная продукция за год (гС/ (м² год)).

Таблица 2

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
2008	0,13	0,31	0,44	0,86	1,01	0,78	0,79	0,65	0,53	0,45	0,41	0,29	202
2009	0,25	0,31	0,49	0,88	1,09	0,75	0,74	0,61	0,53	0,48	0,41	0,32	208
2010	0,28	0,35	0,45	0,83	1,07	0,93	0,83	0,91	0,77	0,64	0,56	0,41	244
2011	0,34	0,42	0,62	0,97	1,04	1,06	0,85	0,89	0,73	0,67	0,48	0,32	255
2012	0,28	0,34	0,52	0,85	1,13	0,85	0,88	0,85	0,74	0,62	0,51	0,34	240

В табл. 2 и на рис. 2 продемонстрирован годовой ход суточной продукции, где месяцы отмечены римскими цифрами. В январе спутниковые данные позволяют вычислить продукцию в основном вдоль северо-западного побережья моря, да и она не слишком велика. В апреле и августе суточная продукция существенно выше, наибольшие значения встречаются вдоль западного побережья, особенно на юго-западе. Обнаруживаются отдельные продуктивные места на юго-востоке у побережья Японии.

На рис. 2 также видна несколько повышенная продуктивность фитопланктона в 2011 г. по сравнению с другими.

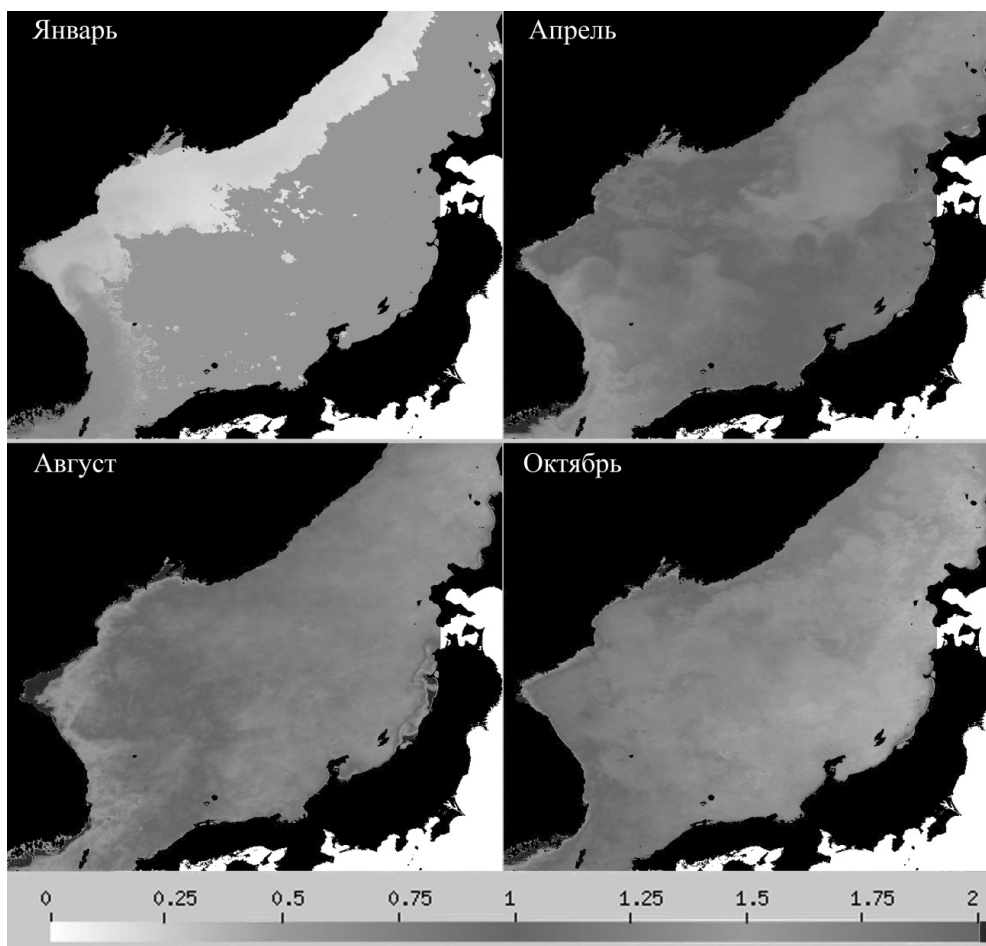


Рис. 1. Суточная среднемесячная продукция под 1 м² в январе, апреле, августе и октябре 2011 г. в Японском море.

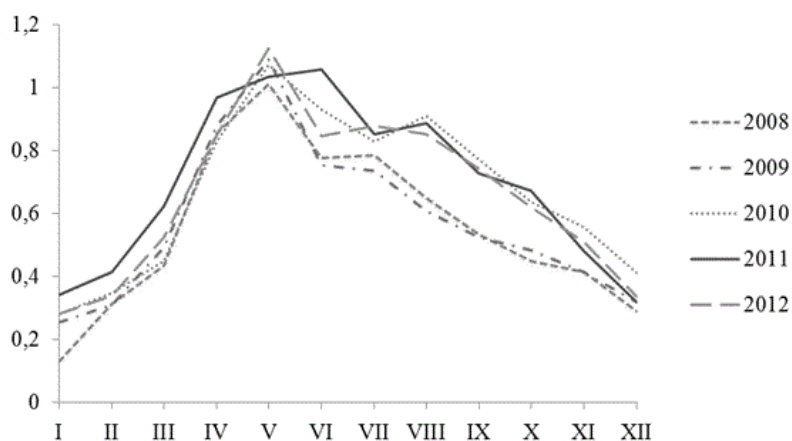


Рис. 2. Сравнение динамик суточной продукции в течение года (гС/(м²сут)).

Присутствует максимум значений продукции в мае и двух соседних месяцах и менее значительный – в августе, с последующим спадом к концу года. В работе [9] присутствуют два максимума: весенний и осенний. Различие результатов связано, на наш взгляд, с иным способом учета пищевых стимулов. Пищевой стимул в нашей модели ведет себя одинаково по всему морю, в работе же [9] концентрация минеральных веществ меняет свое состояние в зависимости от географических координат. Такой подход диктуется различной трактовкой пищевых

ресурсов в работе [9] и нынешней. Переходом к новой трактовке пищевых ресурсов как пищевого стимула мы стремимся ослабить зависимость результатов модельных расчетов от экспериментальных данных. Количественная информация о минеральных веществах в море носит эпизодический характер по времени и пространству, ее накопление происходит медленно.

На рис. 3 и 4 показаны распределения освещенности, температуры, хлорофилла, продуктивности по глубине в двух выбранных точках Японского моря. Точка А (42.4°с.ш.;132.0° в.д.) находится в северо-западной части моря (залив Петра Великого), а точка В (36.4° с.ш.; 135.1° в.д.) – в юго-восточной части, у берегов Японии. Распределения в точках А и В указаны для следующих месяцев 2011 г.: январь (— · — ·); апрель (----); август (—); октябрь (— —).

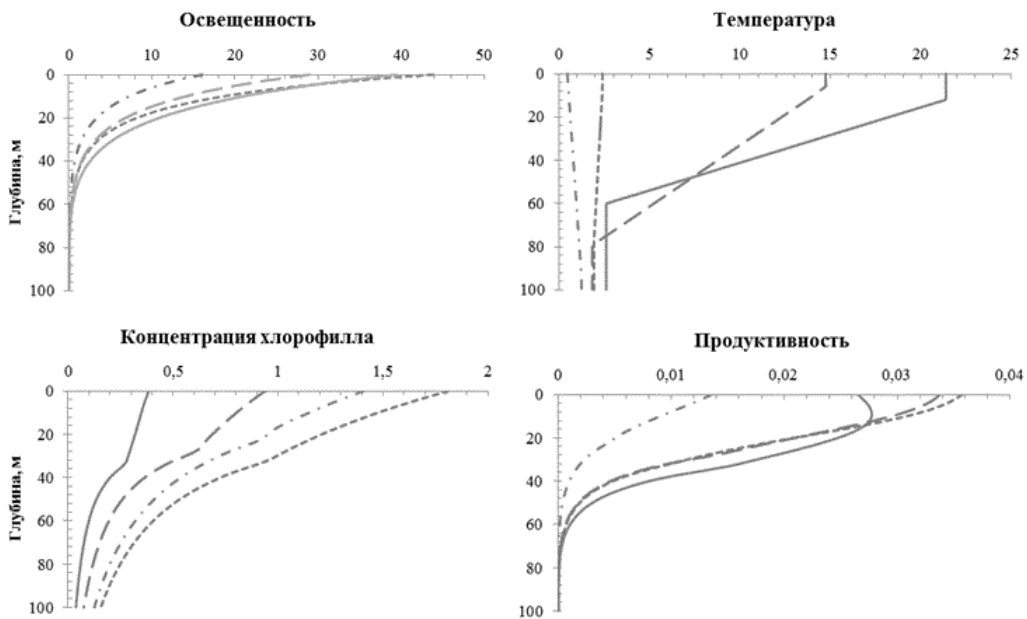


Рис. 3. Распределения освещенности, температуры, хлорофилла, продуктивности в точке А.

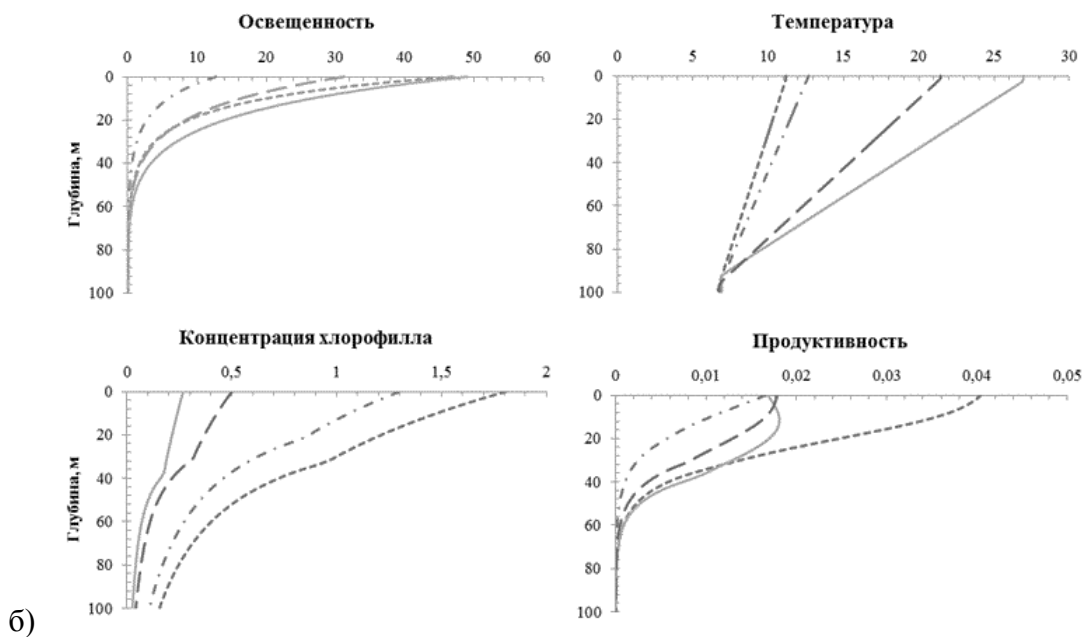


Рис.4. Распределения освещенности, температуры, хлорофилла, продуктивности в точке В.

Освещенность описывается дифференциальным уравнением в модели (1), температура задана функцией на основе формул (4), (5) [17]. Концентрация хлорофилла рассчитывается в модели (1). Все эти три характеристики вычисляются по спутниковым данным об их значениях на поверхности воды (при $x = 0$). Продукция вычисляется по формулам (6), (7) с применением функций освещенности, температуры и концентрации хлорофилла в зависимости от глубины.

В северных районах (точка А) летом образуется слой термоклина, являющийся причиной и индикатором формирования выше этого слоя верхнего перемешанного слоя. В верхнем перемешанном слое в течение лета и частично осенью происходит интенсивное биопродуцирование. На юге (точка В) ход температуры по глубине обладает меньшими градиентами, процесс производства биопродукции меняется с глубиной не так значительно.

В обеих точках (А и В) можно отметить парадоксальное, казалось бы, поведение концентраций хлорофилла на поверхности моря по спутниковым данным: в августе они наименьшие, а январские значения превосходят летние и осенние. Но учет распределения хлорофилла по глубине и расчет продукции «ставит все на свои места» (табл. 2) – объем продукции фитопланктона в январе оказывается наименьшим по отношению с другими месяцами года (рис. 2).

Заключение

Полученные оценки биопродуктивности отдельных районов и Японского моря соответствуют известным результатам о Японском море [18 – 22] и других морях [6, 23], а также хорошо соотносятся с общими представлениями о продуктивности морей и океанов [24].

Проведенная модификация модели, в частности введение понятия «пищевой стимул», освободило от необходимости находить детальную информацию о минеральных веществах и упростило ее использование. Уровень достоверности результатов расчетов связан с уровнем надежности исходных данных и уровнем адекватности модели. Качественно оценивая точность спутниковых данных как среднюю, можно утверждать, что данная сравнительно простая модель адекватна исходной информации об объекте и результаты имеют сравнимый с исходной спутниковой информацией уровень точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jørgensen S.E.* Lake management. Water development, supply and management. – Oxford: Pergamon Press, 1980.
2. *Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б.* Математические модели биологических продукционных процессов. – М.: Изд-во МГУ, 1993.
3. *Williams P.J.B.* Phytoplankton productivity. – NY.: Wiley and Sons, 2007.
4. *Tanaka Y., Mano H.* Functional traits of herbivores and food chain efficiency in a simple aquatic community model // *Ecological Modelling*. – 2012. – Vol. 237-238. – P. 88-100.
5. *Ryabov A.B., Rudolf L., Blasius B.* Vertical distribution and composition of phytoplankton under the influence of an upper mixed layer // *Journal of Theoretical Biology*. – 2010. – Vol. 263. – P. 120-133.
6. *Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Морской*

- экологичный журнал. – 2009. – Т. 8, № 1. – С. 81-106.
7. *Platt T., Gallegos C.L., Harrison W.G.* Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton // *Journal Marine Research*. – 1980. – Vol. 38, N 4. – P. 687-701.
 8. *Абакумов А. И., Израильский Ю. Г.* Влияние условий среды на распределение фитопланктона в водоеме // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2012. – Т.7, № 1. – С. 274-283.
 9. *Пак С.Я., Абакумов А.И.* Модельный способ восстановления состояния фитопланктона в вертикальном столбе воды по спутниковым данным о поверхностном слое // *Информатика и системы управления*. – 2014. – № 3(41). – С. 23-32.
 10. *Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г. и др.* Разработка технологий спутникового мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников // *Открытое образование*. – 2010. – № 5. – С.41-49.
 11. *Алексанин А.И., Ким В., Орлова, Т.Ю., Стоник И.В., Шевченко О.Г.* Фитопланктон залива Петра Великого и задача его дистанционного зондирования // *Океанология*. – 2012. – Т. 52, №2. – С. 239-250.
 12. *Chorin A.J., Marsden J.E.* A mathematical introduction to fluid mechanics. Third edition. – Springer, 1992.
 13. *Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов И.А.* Динамические модели экологических систем. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.
 14. *Monod J.* The growth of bacterial cultures // *Annual Review of Microbiology*. – 1949. – Vol. 111, N 2. – P. 371-394.
 15. *Platt T., Caverhill C., Sathyendranath S.* Basin-scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic // *Journal of Geophysical Research*. – 1991. – Vol. 96, Is. C8. – P. 15147-15159.
 16. *Grangere K., Lefebvre S., Menesguen A., Jouenne F.* On the interest of using field primary production data to calibrate phytoplankton rate processes in ecosystem models // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2009. –Vol. 81. – P. 169-178.
 17. *Добровольский А. Д., Залогин Б. С.* Моря СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1982.
 18. *Kyung-Ae Park, Ji-Eun Park, Min-Sun Lee and Chang-Keun Kang.* Comparison of Composite Methods of Satellite Chlorophyll-a Concentration Data in the East Sea // *Korean Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol.28, N 6. – P.635-651.
 19. *Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я.* Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // *Океанология*. – 2006. – Т.46. – С. 27-37.
 20. *Захарков С.П., Лобанов В.Б., Гордейчук Т.Н., Морозова Т.В., Штрайхерт Е.А.* Пространственная изменчивость хлорофилла «а» и видового состава фитопланктона в северо-западной части Японского моря в зимний период // *Океанология*. – 2012. – Т.52, №3. – С. 381-391.
 21. *Пак С.Я.* Оценка продуктивности Японского моря по спутниковой информации // *Информатика и системы управления*. – 2014. – № 1(39). – С. 61-69.
 22. *Пищальник В.М., Леонов А.В., Архипкин В.С., Мелкий В.А.* Математическое моделирование условий функционирования экосистемы Татарского пролива. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011.
 23. *Mustapha M.A., Sei-Ichi S., Lihan T.* Satellite-measured seasonal variations in primary production in the scallop-farming region of the Okhotsk Sea // *ICES Journal of Marine Science*. – 2009. – Vol.66(7). — P. 1557-1569.
 24. *Мусеев П.А.* Биологические ресурсы Мирового океана. – М.: Агропромиздат, 1989.

E-mail:

Ярусов Михаил Михайлович – myrpl@yandex.ru;

Абакумов Александр Иванович – abakimov@iacp.dvo.ru.