

УДК: 519.8

## Модельный способ оценки содержания хлорофилла в море на основании спутниковой информации

А. И. Абакумов<sup>а</sup>, Ю. Г. Израильский<sup>б</sup>

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5  
Дальневосточный федеральный университет,  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8

E-mail: <sup>а</sup> abakumov@iacp.dvo.ru, <sup>б</sup> izrailsk@iacp.dvo.ru

Получено 12 февраля 2013 г.,  
после доработки 22 апреля 2013 г.

На основе математической модели динамики биомасс фитопланктона построен способ оценки содержания хлорофилла в районе моря с учетом его распределения по глубине. Модель построена на основе уравнения «реакция-диффузия», учитывает основные влияющие факторы: минеральное питание, освещенность и температуру. Используется спутниковая информация о поверхностном слое моря. Приведен пример расчетов для залива Петра Великого (Японское море).

Ключевые слова: математическая модель, хлорофилл, микротурбулентная диффузия, минеральное питание, освещенность, температура, дистанционное зондирование

### Model method of vertical chlorophyll concentration reconstruction from satellite data

A. I. Abakumov, Yu. G. Izrailsky

*Institute of Automation and Control Processes, 5 Radio street, Vladivostok, 690041, Russia  
Far Eastern Federal University, 8 Sukhanov street, Vladivostok, 690950, Russia*

**Abstract.** — A model, describing the influence of external factors on temporal evolution of phytoplankton distribution in a horizontally-homogenous water layer, is presented. This model is based upon the reaction-diffusion equation and takes into account the main factors of influence: mineral nutrients, insolation and temperature. The mineral nutrients and insolation act oppositely on spatial phytoplankton distribution. The results of numerical modeling are presented and the prospect of applying this model to reconstruction of phytoplankton distribution from sea-surface satellite data is discussed. The model was used to estimate the chlorophyll content of the Peter the Great Bay (Sea of Japan).

Keywords: mathematical model, Chlorophyll, microturbulent diffusion, mineral nutrients, insolation, temperature, remote sensing

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 473–482 (Russian).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-01-98517-р\_восток\_а и ДВО РАН, проект № 12-П-СО-01М-010.

## Введение

Жизнедеятельность фитопланктона является основой функционирования водной экосистемы. При фотосинтезе с помощью энергии солнца и находящихся в воде минеральных веществ создаются и развиваются растительные микроорганизмы [Рубин, 2004], остальная жизнь в воде обеспечивается этими начальными процессами. Фитопланктон является также индикатором состояния водной экосистемы, его количественные и качественные характеристики дают возможность судить о жизнеспособности и продуктивности экосистемы [Jorgensen, 2010].

Изучение состояния и закономерностей развития фитопланктона в морских экосистемах является предметом многочисленных исследований [Моисеев, 1989; Шушкина и др., 1997; Smith et al., 2011]. В условиях моря получение приемлемой и надежной информации о фитопланктоне представляет собой непростую задачу из-за пространственной неоднородности и быстрой изменчивости состояния фитопланктона. Контактные методы (судовые экспедиционные исследования, автоматические датчики) при значительной сложности и затратности реализации не охватывают необходимые пространственно-временные диапазоны. Дистанционные методы зондирования поверхности океана дают обширный и систематизированный материал для изучения экосистем и сообществ. Спутниковая информация содержит данные о концентрации хлорофилла и его флуоресценции, освещенности и температуре, мутности воды и ряде других характеристик поверхностного слоя океана [Копелевич, Лаппо, 2005; Левин и др., 2010]. Однако точность этих данных невелика, качественный состав информации о живой составляющей морской экосистемы не очень представительен [Fu et al., 1998; Пелевин, 1998]. Применение математических моделей позволяет наиболее полно использовать доступную информацию о фитопланктоне [Алексеев и др., 1992; Murray, 2002]. В данной работе рассматривается задача восстановления распределения хлорофилла в толще воды по спутниковым данным о поверхностном слое.

Здесь и далее под хлорофиллом понимается хлорофилл «а», который наиболее подробно отслеживают с околоземных космических аппаратов. Распределение хлорофилла мы восстанавливаем с помощью математической модели функционирования фитопланктона в вертикальном столбе воды водоема. Хлорофилл содержится в фитопланктоне, обеспечивает процессы фотосинтеза и продуцирование биомассы.

Полученные оценки содержания хлорофилла в водоеме можно использовать для оценки первичной продукции водной экосистемы, которая определяет биопродуктивность всей экосистемы, а также для решения других задач [Шушкина и др., 1997]. Эти проблемы выходят за рамки данной статьи. Здесь приведен пример расчета распределения хлорофилла по спутниковым данным залива Петра Великого в Японском море.

## Модель динамики биомасс фитопланктона

Схема оценки содержания хлорофилла основана на модельном описании жизнедеятельности фитопланктона. Мы рассматриваем жизнедеятельность фитопланктона в вертикальном одномерном столбе воды без ее направленного движения. В реальности этот столб воды в водоеме перемещается, искажается и перемешивается с другими. Все эти процессы мы оставили в стороне для анализа влияния экологических условий среды на жизнедеятельность фитопланктона. Модель определяет то содержание хлорофилла в толще воды, которое обеспечивает наблюдаемые концентрации его на поверхности. Оставив в стороне адвекцию и конвекцию, считаем, что основную роль при перемещении веществ в воде играет диффузия, в первую очередь, микротурбулентная. Фитопланктон и минеральные вещества перемещаются в модели вследствие молекулярной и микротурбулентной диффузии. Турбулентная диффузия играет основную роль, коэффициенты микротурбулентной диффузии на несколько порядков больше, чем молекулярной [Озмидов, 1986; Ryabov et al., 2010].

От пространственного распределения фитопланктона существенно зависит первичная продукция и биопродуктивность водоема. В свою очередь, продуктивность фитопланктона в значительной мере определяется процессом потребления минеральных веществ при строительстве растительного организма в ходе фотосинтеза [Ризниченко, Рубин, 1993; Силкин, Хайлов, 1988]. Фотосинтез зависит от освещенности, точнее, фотосинтетически активной радиации (ФАР). Часто утверждается, что солнечного света для фотосинтеза всегда достаточно, но его ослабление в воде может быть разным, а это во многом определяет распределение фитопланктона в воде по глубине. Регулирующую роль для жизненных процессов играет температура воды [Jorgensen, 2010]. Поэтому из факторов окружающей среды мы учитываем минеральное питание, освещенность и температуру.

Модель описывает динамику объемной концентрации хлорофилла на основе динамики биомассы фитопланктона в зависимости от условий внешней среды и особенностей пространственного распределения в столбе воды по глубине. Все процессы рассматриваются во времени  $t$ . Фитопланктон обитает в вертикальном столбе воды, глубина обозначена  $x \in [0, \bar{x}]$ , где  $\bar{x}$  — глубина фотического слоя. Объемная концентрация хлорофилла обозначена  $y(t, x)$ . Принято предположение о синхронном изменении массы хлорофилла с биомассой фитопланктона. Рост биомассы фитопланктона происходит в процессе фотосинтеза. Энергия солнца и минеральные вещества в водной среде — основные источники пополнения биомассы. Поэтому мы учитываем освещенность поверхности океана и ее распределение  $I(t, x)$  по глубине  $x$ . Через  $z(t, x)$  обозначена плотность массы минеральных веществ. Изменение биомассы фитопланктона зависит от температуры  $\theta(t, x)$  водной среды. Глубина  $x$  измеряется в метрах, время  $t$  в сутках, концентрация хлорофилла — в  $\text{мг/м}^3$ , плотность минерального вещества — в  $\text{г/м}^3$ , освещенность  $I(t, x)$  (ФАР) измеряется в молях фотонов на  $\text{м}^2\text{сут}$ , температура — в градусах Цельсия.

В основе модели лежит уравнение «реакции-диффузии» [Cantrell, Cosner, 2003]:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = k_y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \mu(I, z, \theta)y - e(y)y, \quad (1)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = k_z \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \gamma\mu(I, z, \theta)y + \beta\gamma e(y)y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -\alpha(t, x, y, z)I. \quad (3)$$

Минеральные вещества и фитопланктон пассивно перемещаются за счет диффузии с коэффициентами диффузии  $k_z, k_y$ . Параметром  $\alpha$  обозначено ослабление света в водной среде по глубине.

Функционирование фитопланктона описывается параметрами удельной скорости роста биомассы фитопланктона за счет потребленных минеральных веществ и удельной скорости  $e$  элиминации биомассы фитопланктона из-за выедания зоопланктоном и иных причин смертности. Параметр  $\beta$  характеризует долю возвращаемых минеральных веществ при отмирании органики после бактериального разложения, а параметр  $\gamma$  — усредненную долю учтенных минеральных веществ в растительных организмах.

Функция удельной скорости роста на основе гипотезы о независимости выделенных влияющих факторов приобретает вид:  $\mu(I, z, \theta) = \mu_0 \mu_z(z) \mu_I(I) \mu_\theta(\theta)$ . Константа  $\mu_0$  определяет максимальную скорость роста при средней температуре воды  $\theta_0$ . Зависимость от минеральных веществ представляется классической зависимостью Моно  $\mu_z(z) = z/(z_0 + z)$  [Monod, 1949]. Зависимость от освещенности принята в экспоненциальном виде с применением аналога интервала толерантности  $\mu_I(I) = \frac{I}{I_m} \exp\left(-\delta \frac{I}{I_m}\right)$ . Зависимость скорости роста от температуры представлена в экспоненциальном виде  $\mu_\theta(\theta) = \exp\left(\rho \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)$  [Jorgensen, 2010]. Удельная скорость элиминации линейно

зависит от плотности вида:  $e(y) = e_0 + e_1y$ . Коэффициент затухания освещенности  $\alpha(t, x, y, z)$  линейно учитывает влияние общей мутности воды и затенение планктоном, минеральными веществами:  $\alpha(t, x, y, z) = \alpha_0 + \alpha_1y + \alpha_2z$ . Максимальную глубину фотического слоя принимаем равной 100 метрам. Это соответствует определению фотического слоя при используемом нами коэффициенте ослабления света [Ryabov et al., 2010]. А именно, на нижней границе слоя освещенность должна быть равна 1 % освещенности на поверхности.

Спутниковые данные дают нам освещенность  $I^{(0)}(t)$  и температуру  $\theta^{(0)}(t)$  на поверхности. Соотношение  $I(t, 0) = I^{(0)}(t)$  выступает в качестве граничного условия. Равенство  $\theta(t, 0) = \theta^{(0)}(t)$  используется для вычисления распределения температуры  $\theta(t, x)$  по глубине  $x$  в соответствии с сезонными закономерностями. Эти закономерности описаны следующим образом.

Динамика температур моделируется унимодальным распределением по вертикали  $\theta(t, x) = \theta_m(t) \exp\left(-\frac{(x-x_\theta(t))^2}{2\sigma^2(t)}\right)$  с сезонным смещением максимума температур и температурных градиентов в виде кусочно-линейных функций в соответствии с таблицей значений.

Таблица 1. Таблица для определения параметров функции  $\theta(t, x)$

$t$	0	70	140	300	365
$\sigma$	100	100	20	20	100
$x_\theta$	40	40	0	0	40

Функция  $\theta_m(t)$  вычисляется из условия  $\theta(t, 0) = \theta^{(0)}(t)$ . Начальные и граничные условия определяются для хлорофилла спутниковыми данными, а для минеральных веществ — условием отсутствия обмена с атмосферой и наличием фиксированного содержания минеральных веществ на нижней границе фотического слоя.

Свойства модели (1)–(3) о функционировании фитопланктона в вертикальном столбе воды исследованы нами в работе [Абакумов, Израильский, 2012].

## Модельный анализ спутниковых данных о заливе Петра Великого

На спутниковых данных трех лет (2008–2010 годы) модельно определяется динамика содержания хлорофилла в водах залива Петра Великого. Рассматривается район, ограниченный с севера и запада побережьем России, Китая и Северной Кореи, с юга — параллелью  $42^\circ$  северной широты, с востока — меридианом  $135^\circ$  восточной долготы (рис. 1). Этот район следует называть «заливом Петра Великого с прилегающей северной частью Японского моря». Мы для краткости будем называть его заливом Петра Великого (ПВ).

Спутниковые данные получены Центром коллективного пользования (ЦКП) регионального спутникового мониторинга окружающей среды Дальневосточного отделения (ДВО) РАН от радиометра MODIS [Левин и др., 2010]. ЦКП регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН осуществляет круглосуточный прием и обработку данных со спутников Aqua и Terra в автоматическом режиме. Обработка производится с помощью программного комплекса SeaDAS, свободно-распространяемого NASA (см. сайт <http://seadas.gsfc.nasa.gov/>). Результаты обработки представляются в виде обзорных изображений поверхности океана. Сотрудник ЦКП Е. В. Фомин построил усредненные ежемесячно карты концентрации хлорофилла «а», рассчитанные с использованием алгоритма Кардера [Fu et al., 1998], карты температуры и освещенности. Авторы выражают благодарность сотрудникам ЦКП за предоставленную информацию.

На рисунках 2–4 приведен пример данных для апреля 2010 года. По вертикали указана географическая широта, по горизонтали — долгота.

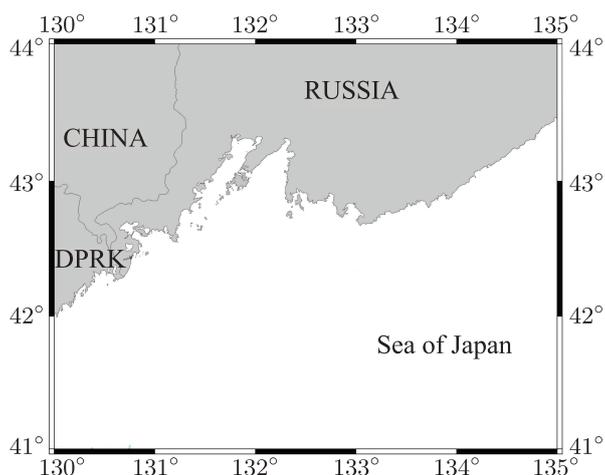


Рис. 1. Залив Петра Великого и прилегающая часть Японского моря

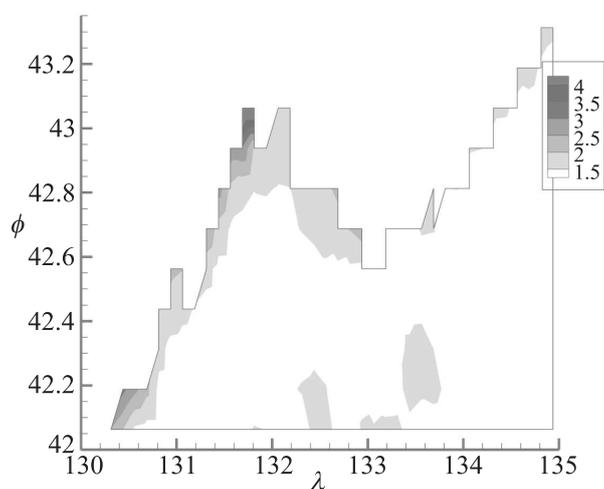


Рис. 2. Концентрация хлорофилла ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в поверхностном слое воды в апреле 2010 года по спутниковым данным

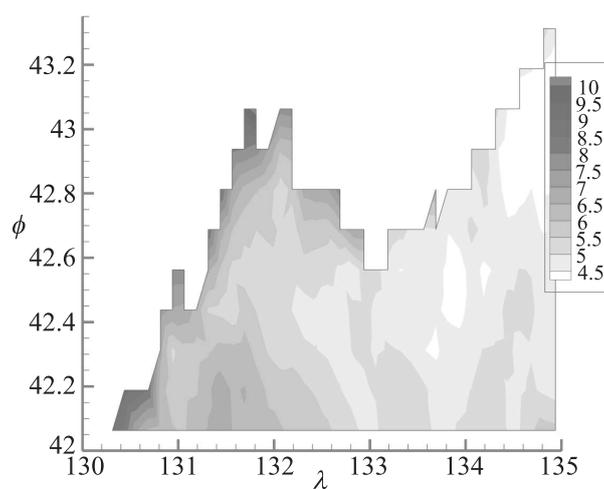


Рис. 3. Температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) поверхности воды в апреле 2010 года по спутниковым данным

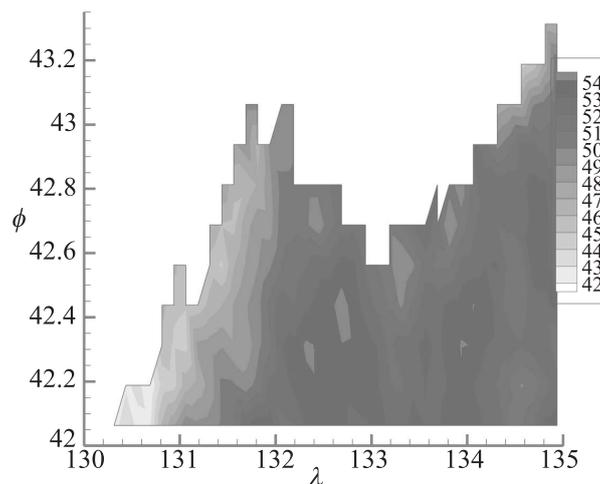


Рис. 4. Освещенность (моль фотонов на м<sup>2</sup> сут) поверхности в апреле 2010 года по спутниковым данным

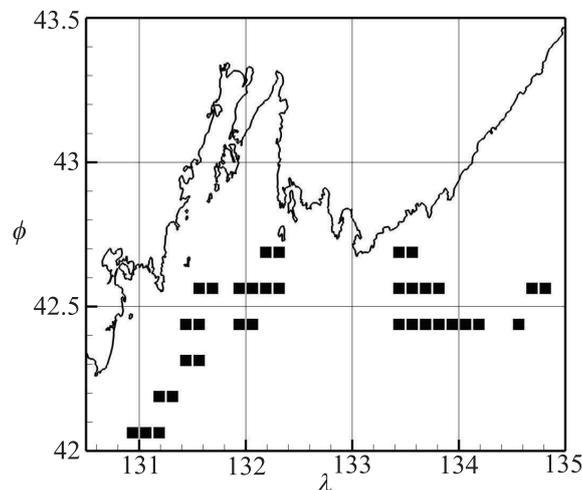


Рис. 5. Места наличия спутниковых данных по всем месяцам 2008–2010 годов. По вертикальной оси показана широта, по горизонтальной — долгота в градусах. Черные точки обозначают центры квадратов со стороной 1/8 градуса по широте и долготе, где присутствуют данные

Концентрация хлорофилла в целом снижается от побережья в юго-восточном направлении (рис. 2). Это происходит синхронно с изменением температуры поверхности (рис. 3). Освещенность, в противоположность температуре, нарастает в юго-восточном направлении (рис. 4). Сложность использования спутниковой информации заключается, в частности, в ее значительном отсутствии по времени и пространству. Мы осуществляли модельную обработку данных по точкам пространства, где эти данные присутствовали во все месяцы трех лет (рис. 5).

Эти данные использовались для анализа динамики содержания хлорофилла в указанные три года. Используемые численные значения большинства параметров модели (1)–(3) почерпнуты из литературных источников. Настройка модели [Абакумов, Израильский, 2012] производилась на основе литературных данных о численных значениях параметров [Ryabov et al., 2010; Шушкина и др., 1997] и качественных представлений о распределении фитопланктона в водоеме по глубине [Моисеев, 1989]. Приведенные результаты можно рассматривать как предварительные и иллюстративные. Наша цель состоит в том, чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого модельного подхода.

В результате расчетов усредненное по поверхности содержание хлорофилла под единицей площади поверхности оказалось изменяющимся согласно кривым рисунка 6. На рисунках 6 и 7 прерывистые кривые указывают доверительные интервалы изменений показателей с доверительной вероятностью 0.95 (в предположении, что отклонения распределены нормально).

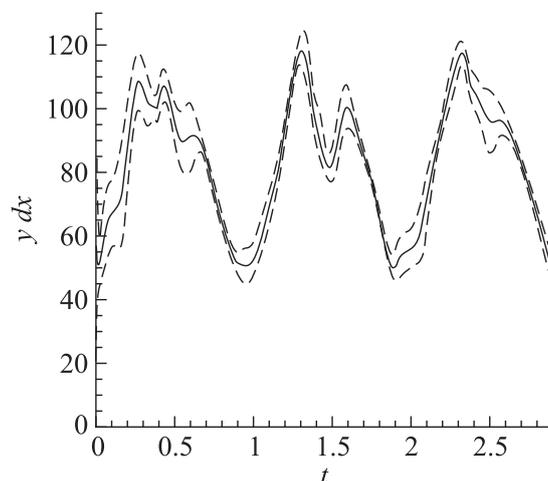


Рис. 6. Расчетная динамика содержания хлорофилла под единицей площади ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ) в среднем по заливу ПВ (сплошная линия). Нижняя и верхняя прерывистые линии указывают интервальную оценку содержания хлорофилла с доверительной вероятностью 0.95. По горизонтальной оси указано время в годах.

Температура воды несколько выше в прибрежных районах и на юге залива. Освещенность достаточно монотонно возрастает от северо-западной части на юго-восток. Поверхностная же концентрация хлорофилла в указанных точках изменяется согласно рисунку 7. Можно видеть, что содержания хлорофилла по спутниковым данным на поверхности и по модельным расчетам во всем фотическом слое воды меняются, грубо говоря, в противофазе. Это может объясняться тем, что летом фитопланктон распределен на большую глубину с уменьшением его концентрации на поверхности, зимой же он «прижат» к поверхности (рис. 8 для отдельной точки поверхности залива).

Спутниковые данные о поверхностном слое и модельные расчеты указывают на наличие одного (весеннего) или двух (весеннего и осеннего) «всплесков» содержания хлорофилла. Летом наблюдается спад. Повышение температуры воды и накопленное за зиму питание обеспечивают весенний «всплеск» фитопланктона (хлорофилла). Летний спад объясняется дефицитом минерального питания и «приглубленностью» фитопланктона. Из-за этого в спутниковых наблюдениях спад гораздо глубже, чем в модельной имитации (рис. 8). После этого спада наблюдается осенний подъем содержания фитопланктона (хлорофилла). Зимой фитопланктона меньше, но он прижат к поверхности, из-за чего спутниковые данные показывают незначительное уменьшение по сравнению с модельными расчетами. Это в основном согласуется с качественными описаниями в литературе [Моисеев, 1989], модельные расчеты поясняют возможные механизмы явлений и дают количественные оценки.

## Заключение

Построенная модель (1)–(3) пригодна для оценок содержания хлорофилла в районах моря на основе известных спутниковых данных о поверхностном слое. Такие расчеты позволяют уточнять оценки биопродуктивности морских экосистем.

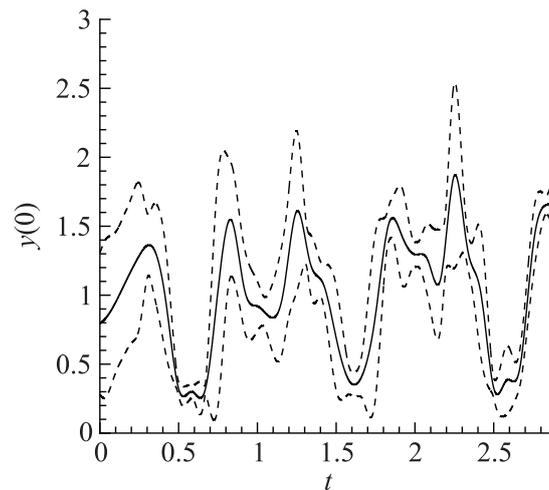


Рис. 7. Спутниковые данные об объемной концентрации ( $\text{мг/м}^3$ ) хлорофилла в поверхностном слое воды в среднем по заливу ПВ (сплошная линия). Нижняя и верхняя прерывистые линии указывают интервальную оценку содержания хлорофилла с доверительной вероятностью 0.95. По горизонтальной оси указано время в годах.

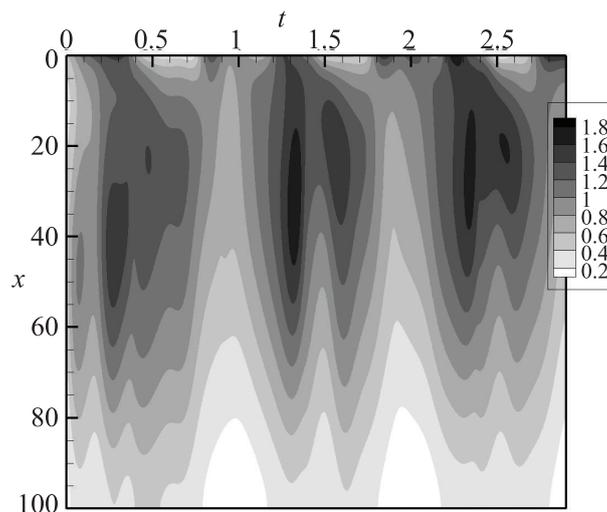


Рис. 8. Расчетная динамика объемной концентрации ( $\text{мг/м}^3$ ) хлорофилла в точке с координатами  $42.125^\circ$  северной широты и  $131.125^\circ$  восточной долготы с распределением по глубине. По горизонтальной оси указано время в годах, по вертикальной — глубина в метрах.

Модель содержит ряд экосистемных параметров, зависящих от многих факторов внешней среды. Коэффициенты ослабления света, диффузии, параметры зависимостей роста фитопланктона от минерального питания и ряд других параметров зависят от региональных особенностей, сезона и ряда других характеристик среды обитания [Шушкина и др., 1997; Tanaka, Manoа, 2012; Ryabov et al., 2010]. Настройка модели на конкретную ситуацию требует дополнительных усилий. Многочисленные вычислительные эксперименты (не приведенные в статье) указывают на значительную устойчивость результатов модельных расчетов по отношению к вариациям параметров. Эта устойчивость, в первую очередь, связана с неоднородностью пространственного распределения хлорофилла из-за пространственной неоднородности среды обитания.

Демонстрируемая в статье картина распределения хлорофилла в заливе Петра Великого обладает качественными особенностями, в той или иной мере проявляющимися в других природных ситуациях [Моисеев, 1989]. Одна из особенностей характеризуется одним (весенним) или двумя (весенним и осенним) максимумами содержания хлорофилла в столбе воды. Другая особенность обнаружена модельно и состоит в «приглублении» основных масс хлорофилла летом, за счет чего в спутниковых данных о поверхностном слое возникает летний провал концентраций хлорофилла.

Носителем хлорофилла является фитопланктон. Полученные данные модельных расчетов позволяют судить о продуктивности морской экосистемы. Продолжение этих исследований видится в детализации фитопланктонного сообщества и модельном исследовании влияния фитопланктона на другие составляющие морской экосистемы.

## Список литературы

- 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.
- Алексеев В. В., Крышев И. И., Сазыкина Т. Г. Физическое и математическое моделирование экосистем. — СПб: Гидрометеоздат, 1992. — 364 с.
- Копелевич О. В., Лаппо С. С. Использование спутниковых данных для исследования и мониторинга морей и океанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2005. — Т. 2, № 1. — С. 30–39.
- 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.
- Моисеев П. А. Биологические ресурсы Мирового океана. — М.: Агропромиздат, 1989. — 368 с.
- Озмидов Р. В. Диффузия примесей в океане. — Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. — 280 с.
- Пелевин В. Н. Исследование морей России дистанционными средствами с судов и космических носителей: оценка экологического состояния вод // Информационный бюллетень РФФИ. — 1998. — Т. 6, № 5. — С. 351.
- Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б. Математические модели биологических продукционных процессов. — М.: Изд-во МГУ, 1993. — 301 с.
- Рубин А. Б. Биофизика. — МГУ, 2004. — Т. 2. — 464 с.
- Силкин В. А., Хайлов К. М. Биоэкологические механизмы управления в аквакультуре. — Ленинград: Наука, 1988. — 230 с.
- Шушкина Э. А., Виноградов М. Е., Гагарин В. И. и др. Оценка продуктивности, скорости обмена, трофодинамики, а также запасов планктонных организмов в разнопродуктивных районах океана на основании спутниковых и экспедиционных наблюдений // Информационный бюллетень РФФИ. — 1997. — Т. 5, № 4. — С. 278.
- Cantrell R., Cosner C. Spatial Ecology via Reaction-Diffusion Equations. — J. Wiley and Sons, 2003. — 411 pp.
- Fu G., Baith K. S., McClain C. R. SeaDAS: The SeaWiFS Data Analysis System // Proceedings of the 4th Pacific Ocean Remote Sensing Conference. — Qingdao, China: 1998. — July 28–31. — P. 73–79.
- Jorgensen S. E. Lake and reservoir management. — Elsevier, 2010. — 512 pp.
- Monod J. The growth of bacterial cultures // Annual Review of Microbiology. — 1949. — Vol. 11, No. 2. — P. 371–394.
- Murray J. D. Mathematical Biology: I. An Introduction. — 3 edition. — Springer, 2002. — 576 pp.

- Ryabov A., 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.
- Smith S. L., Pahlow M., Merico A., Wirtzd K. W.* Optimality-based modeling of planktonic organisms // *Limnology and Oceanography.* — 2011. — Vol. 56, No. 6. — P. 2080–2094.
- Tanaka Y., Manoa H.* Functional traits of herbivores and food chain efficiency in a simple aquatic community model // *Ecological Modelling.* — 2012. — Vol. 237-238. — P. 88–100.