

## Верификация VGPM и K&I моделей первичной продукции в северо-западной части Японского моря по судовым и спутниковым данным

Ю. В. Шамбарова, И. Е. Стёпочкин, С. П. Захарков

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН  
Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: shambarova@poi.dvo.ru*

В представленной работе рассматривается возможность применения моделей VGPM и K&I для расчёта первичной продукции (ПП) в прибрежных водах северо-западной части Японского моря. Проведены натурные измерения ПП и других биооптических характеристик морской воды. Данные *in situ* включают концентрации хлорофилла *a* (КХЛ) и ПП, полученные эталонными методами, а также температуру поверхности океана (ТПО), интенсивность фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) на поверхности, эвфотическую глубину, полученные при помощи погружного зонда STD. Также были использованы данные спектров отражательной способности морской воды (RRS), полученные измерением с борта судна при помощи портативного спектрорадиометра ASD FieldSpec HandHeld. Проведено сравнение с данными сканера цвета морской поверхности MODIS спутника Aqua уровня L3 (данные по КХЛ, ФАР, ТПО, ПП, эвфотической глубине) с регулярной географической сеткой 4 км. Показаны недостатки моделей VGPM и K&I, предложены некоторые подходы к построению региональной модели оценки ПП. Необходимо учитывать региональные особенности акватории и, в частности, свойства вод второго оптического типа, фотосинтетические характеристики фитопланктона и погрешности оценок спутниковыми сканерами.

**Ключевые слова:** первичная продукция, фитопланктон, дистанционное зондирование океана, VGPM, хлорофилл *a*

Одобрена к печати: 18.03.2019  
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-186-195

### Введение

Оценка величины первичной продукции (ПП) — одного из основных компонентов экосистемы — является важной задачей для современной науки. Первичная продукция представляет собой массу новообразованного органического вещества за определённый период времени. Мера первичной продукции — скорость новообразования органического вещества. Для всех последующих этапов продукционного процесса, происходящего в водоёме, первичная продукция является материальной и энергетической основой (Зуенко, 2008). С одной стороны, образование органического вещества формирует условия для допустимого извлечения морских биоресурсов, необходимых в жизнедеятельности человека. С другой стороны, ПП связана с распределением углекислого газа между атмосферой и гидросферой и, следовательно, с влиянием парникового эффекта на климат.

Актуальность изучения количественной роли океанов в глобальной климатической системе побудила к разработке моделей для определения первичной продуктивности. Использование моделей позволяет оценить пространственно-временную изменчивость ПП в океанических масштабах: от межгодовой до десятилетней и от региональной до глобальной.

Помимо этого, у глобальных моделей есть недостатки, связанные с ошибками оценки ПП в прибрежных водах (Silsbe et al., 2016). Как известно, прибрежные акватории относятся к водам так называемого второго оптического типа. Они подвержены сильным речным стокам и антропогенному воздействию, в результате чего наряду с фитопланктоном важна роль растворённого органического и взвешенного веществ в формировании общей картины биопроductивности. Соотношение между этими компонентами регулярно меняется, в чём состо-

ит кардинальное отличие этих вод от вод первого оптического типа (открытая морская вода) с преобладанием роли фитопланктона (Remote..., 2000).

Некоторые из этих ошибок можно разрешить разработкой региональных алгоритмов расчёта концентрации хлорофилла  $a$  (КХЛ) и первичной продукции (Olita et al., 2011; Tripathy et al., 2012). Оценки ПП имеют решающее значение для понимания многих важных океанических процессов, поэтому крайне важно проводить проверку адекватности различных моделей применительно к конкретной акватории, выясняя их преимущества и недостатки.

Модель VGPM (1) (Vertically Generalized Production Model) была описана учёными М. Бехренфельдом (M. Behrenfeld) и П. Фальковски (P. Falkowski) в 1997 г. в журнале *Limnology and Oceanography* (Behrenfeld, Falkowski, 1997). Расчёт интегрированной по глубине первичной продукции ведётся по формуле:

$$IPP = 0,66125 P_{bopt} \frac{PAR}{PAR + 4,1} Zeu \cdot Cchl \cdot Dirr, \quad (1)$$

где  $IPP$  — значение первичной продукции, интегрированной по глубине;  $PAR$  — ежедневная фотосинтетически активная радиация над морской поверхностью ( $\text{Э} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ );  $Zeu$  — глубина эвфотического слоя (м);  $Cchl$  — концентрация хлорофилла ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );  $Dirr$  — длительность светового дня (ч);  $P_{bopt}$  — удельная оптимальная скорость фотосинтеза: параметр, контролирующий ПП в модели, полиномиальная функция температуры поверхности океана ( $T$ ), которая выражается в миллиграммах углерода на миллиграмм хлорофилла  $a$  в день ( $\text{мгC} \cdot \text{мгChl}^{-1} \cdot \text{день}^{-1}$ ) и рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{bopt} = -3,27 \cdot 10^{-8} T^7 + 3,4132 \cdot 10^{-6} T^6 - 1,348 \cdot 10^{-4} T^5 + 2,462 \cdot 10^{-3} T^4 - 0,0205 T^3 + 0,0617 T^2 + 0,2749 T + 1,2956. \quad (2)$$

Разработка модели велась на основе большого набора данных *in situ* измерений первичной продукции фитопланктона (более 250 000 станций), выполненных методом по  $^{14}\text{C}$  в различных акваториях Мирового океана. Затем проведённая валидация показала высокую (от 0,72 до 0,78) корреляцию смоделированных и *in situ* значений всех без исключения параметров. В настоящее время VGPM является стандартной моделью для расчёта значений ПП по данным, получаемым спутниковыми сканерами MODIS Aqua и VIIRS. Эта модель полезна для предварительной оценки ПП в изучаемой акватории.

Зарубежными и отечественными учёными были проведены работы по верификации глобальной модели VGPM (Ковалева, 2010; An, Son, 2010; Lee et al., 2015; Tripathy et al., 2012). Стоит отметить, что исследований по оценке спутниковых моделей распределения ПП в северо-западной части Японского моря мало (Лобанова и др., 2017). В результате были выявлены недостатки модели, а некоторыми авторами предложены подходы для их устранения. В частности, Т. Камеда (T. Kameda) и Дж. Ишизака (J. Ishizaka) опубликовали работу, целью которой стало создание региональной модели для Японского моря на основе спутниковых данных с учётом физиологических параметров фитопланктонного сообщества (Kameda, Ishizaka, 2005). За основу была взята общепринятая VGPM-модель и *in situ* данные в некоторых точках Японского моря. На основании факта, что  $P_{bopt}$  изменяется не только по температуре, но и по отношению к поверхностному хлорофиллу, авторами был разработан алгоритм для  $P_{bopt}$ , который рассчитывается следующим образом (Kameda, Ishizaka, 2005; Yoon et al., 2012):

$$IPP = 0,66125 \cdot P_{bopt} \frac{PAR}{PAR + 4,1} Zeu \cdot Cchl \cdot Dirr, \quad (3)$$

где

$$P_{bopt} = \frac{0,071T - 3,2 \cdot 10^{-3} T^2 + 3 \cdot 10^{-5} T^3}{Cchl + (1 + 0,17T - 2,5 \cdot 10^{-3} T^2 + 8 \cdot 10^{-5} T^3)}. \quad (4)$$

В настоящей работе рассмотрена стандартная общепринятая модель VGPM и модель K&I для Японского моря. Было проведено сравнение оценок ПП, полученных по стандартной модели VGPM и K&I, с величинами ПП, измеренными *in situ*, и ряд других процедур для выявления недостатков спутниковой модели в изучаемой акватории.

### Используемые методы и данные

Район исследования — залив Петра Великого в северо-западной части Японского моря (рис. 1). Всего было выполнено 38 океанографических станций в период осеннего цветения 2014–2016 гг. Места проведения станций были выбраны исходя из предварительно проанализированного пространственно-временного распределения величины ПП за предыдущие годы по спутниковым данным.

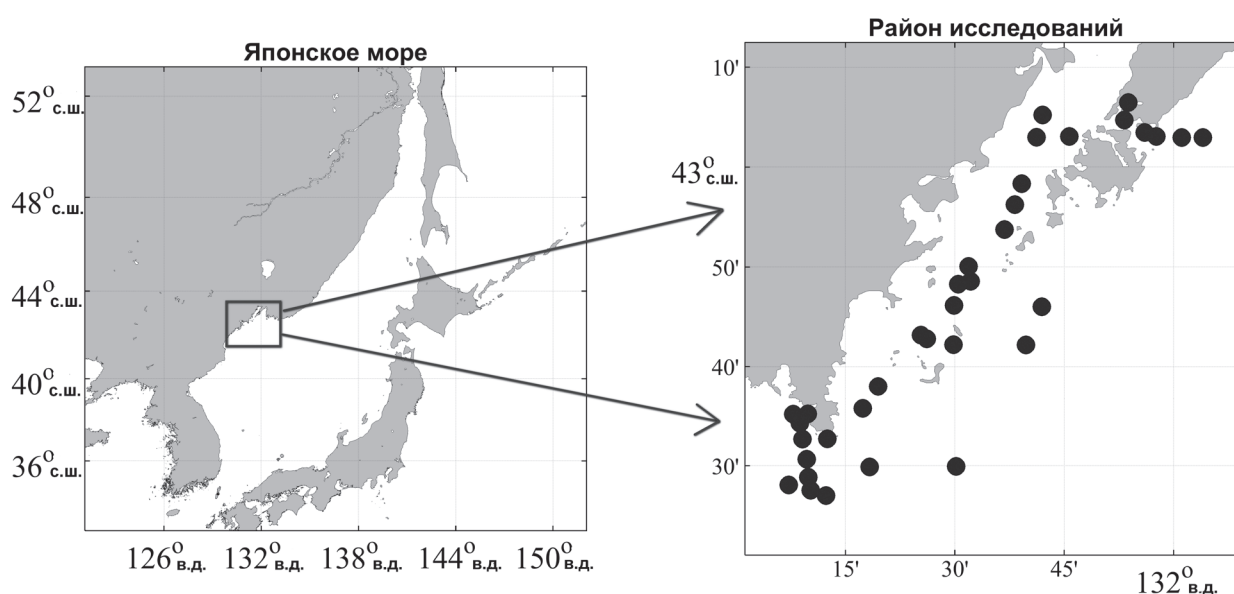


Рис. 1. Район исследования, чёрными точками отмечены станции отбора проб

На каждой станции проводился комплекс следующих измерений:

1. Отбор проб воды в приповерхностных горизонтах для оценки КХЛ при помощи стандартного спектрофотометрического метода, основанного на анализе спектров поглощения экстракта хлорофилла *a* в 90%-м растворе ацетона (Кобленц-Мишке, 1983). Точность этого метода зависит от абсолютной величины КХЛ (Ведерников и др., 1973). КХЛ определялась по оптическим плотностям экстракта хлорофилла, измеренным на трёх длинах волн на спектрофотометре по формуле Джеффри – Хамфри, приведённой в ГОСТе (№ 17.1.4.02-90).

2. Отбор проб воды для определения величин ПП. Определение ПП проводилось с использованием радиоуглеродной модификации скляночного метода, в котором для расчёта интегральной продукции скорость фотосинтеза измеряется на четырёх горизонтах, соответствующих 100 (поверхность), 46, 10, 1 % подповерхностной освещённости. За нижнюю границу эвфотической зоны принимается глубина, до которой достигает 1 % проникающей в воду радиации. На мелководных станциях, где невозможно было отобрать пробы с горизонтов с низкой освещённостью (10, 1 % от поверхностной освещённости), они отбирались с меньшего числа горизонтов. Для вычисления суточных величин первичной продукции использовали методику, предложенную Ю. И. Сорокиным (1997). Радиоактивность планктона, сконцентрированного после экспозиции на мембранные фильтры, измеряется по стандартной методике на жидкостно-сцинтилляционном радиометре Mark III (Захарков и др., 2017).

3. Выполнено глубинное профилирование водной толщи при помощи погружного зонда CTD SeaBird SBE19plus. Прибор имеет в комплекте проточный флуориметр, датчики интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР) и температуры. Флуориметр был калиброван на значения КХЛ, полученные стандартным методом, и принят за эталон. В качестве значения КХЛ использовалась средневзвешенная величина по профилю, весовой функцией выступал профиль ФАР (это значение соответствует сигналу хлорофилла *a*, который «видит» спутник):

$$C_{chlow} = \frac{\sum_{z=0}^{z=Zeu} Cchl(z)PAR(z)}{\sum_{z=0}^{z=Zeu} PAR(z)}, \quad (5)$$

где  $C_{chlow}$  — средневзвешенное значение КХЛ по профилю;  $z$  — глубина. На эвфотической глубине интенсивность ФАР составляет 1 % от значений на поверхности воды (Kim et al., 2000), поэтому измеренный профиль ФАР был аппроксимирован экспоненциальной функцией (Gordon, McCluney, 1975) и  $Zeu$  рассчитывалась по формуле:

$$Zeu = -\frac{\ln(0,01)}{Kpar}, \quad (6)$$

где  $Kpar$  — коэффициент ослабления ФАР по глубине.

4. Проведены измерения спектров отражательной способности морской воды (RRS) при помощи портативного гиперспектрального спектрометра ASD FieldSpec HandHeld. Данный прибор имеет спектральное разрешение 1 нм, спектральный диапазон 325–1075 нм и апертуру объектива 10°. В процессе измерения прибор был направлен углом 45° к поверхности воды с целью избежать попадания в тень от судна. Азимутальный угол составлял 135° от Солнца, чтобы исключить засветку объектива отражённым светом. Подробно эта методика описана в протоколе NASA для надводных радиометрических измерений (Mueller et al., 2003).

Для анализа были использованы данные изменчивости КХЛ, температуры поверхности океана (ТПО), ФАР,  $Zeu$  по спутниковой информации, данные 3-го уровня радиометра MODIS Aqua с регулярной географической сеткой 4 км и временной дискретностью 8 дней, находящиеся в открытом доступе на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. Для анализа изменчивости ПП были взяты данные аналогичного пространственного и временного разрешения, расположенные на ресурсе <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>.

## Результаты

На *рис. 2а* и *б* (см. с. 190) приведены диаграммы рассеяния судовых значений ПП и значений ПП, рассчитанных по данным судовых измерений для ТПО, ФАР, КХЛ,  $Zeu$  согласно моделей VGPM и K&I. На *рис. 2в* показана диаграмма рассеяния соответствующих значений  $P_{bopt}$  для обеих моделей.

На *рис. 2в* серыми точками отмечены вероятные выбросы. Однако тот факт, что на *рис. 2а* и *б* эти точки находятся в пределах погрешности значений ПП, не даёт основания исключать их как выбросы. На *рис. 2а* видно, что коэффициент  $R^2$  (коэффициент детерминации) между измеренными концентрациями ПП и значениями ПП, рассчитанными по данным судовых измерений ТПО, ФАР,  $Zeu$  согласно модели VGPM, составляет 0,27, что является низким показателем и указывает на несовершенство модели VGPM. На *рис. 2б* представлено аналогичное сравнение по данным судовых измерений ТПО, ФАР, КХЛ,  $Zeu$  для модели K&I, здесь коэффициент  $R^2$  более высокий — 0,5, но недостаточно значимый для сопоставления с измеренными концентрациями ПП.

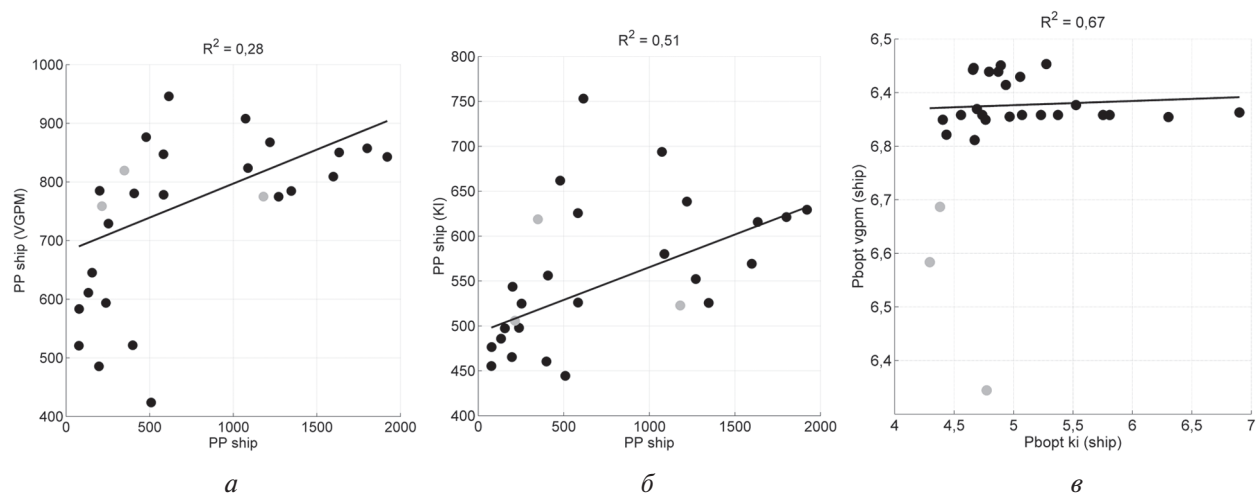


Рис. 2. Сравнение измеренных концентраций ПП (*PPship*) и значений ПП, рассчитанных: *a* — по данным судовых измерений ТПО, ФАР, *Zeu* согласно модели VGPM (*PPship*(VGPM)); *б* — по данным судовых измерений ТПО, ФАР, КХЛ, *Zeu* согласно модели K&I (*PPship*(K&I)); *в* — сравнение параметра *Pbopt*, рассчитанного по данным судовых измерений ТПО для модели VGPM (*Pbopt* VGPM(*ship*)) и по данным судовых измерений ТПО и КХЛ для модели K&I (*Pbopt* K&I(*ship*)). Серыми точками на графиках отмечены вероятные выбросы

На рис. 3а и б показаны диаграммы рассеяния судовых значений ПП (*PPship*) и значений ПП, определенных по данным спутниковых измерений для ТПО, ФАР, КХЛ, *Zeu* согласно моделей VGPM и K&I. На рис. 3в приведено сравнение измеренных концентраций ПП и значений ПП, рассчитанных по спутниковым данным согласно модели K&I, с использованием регионального алгоритма для КХЛ, разработанного для залива Петра Великого авторами статьи (Салюк и др., 2013). КХЛ была рассчитана из спектров RRS согласно формуле:

$$Cchl = 10^{0,69 - 2,71 \lg \left( \frac{RRS(\lambda=496 \text{ нм})}{RRS(\lambda=555 \text{ нм})} \right)}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  — длина волны спектра.

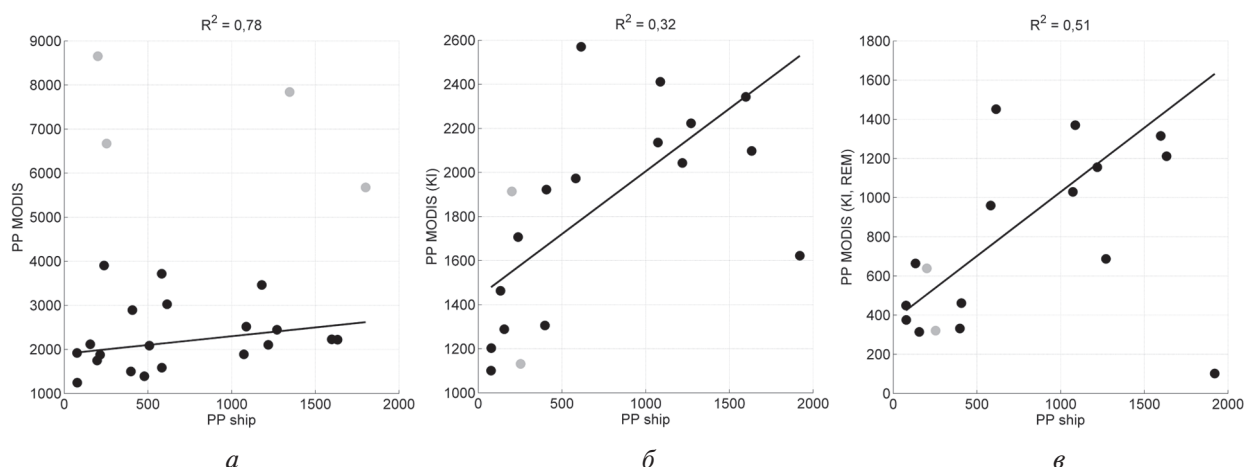


Рис. 3. Сравнение измеренных концентраций ПП (*PPship*) и значений ПП, рассчитанных: *a* — по спутниковым данным сканера MODIS для ТПО, ФАР, *Zeu* согласно модели VGPM (*PP MODIS*); *б* — по спутниковым данным сканера MODIS для ТПО, ФАР, КХЛ, *Zeu* согласно модели K&I (*PP MODIS* (K&I)); *в* — сравнение измеренных концентраций ПП (*PPship*) и значений ПП, рассчитанных по спутниковым данным согласно модели K&I, с использованием регионального алгоритма для КХЛ (*PP MODIS* (K&I, REM)). Серыми точками отмечены крайне высокие спутниковые значения, не характерные для акватории

На *рис. 3а* серыми точками отмечены крайне высокие спутниковые значения, не характерные для акватории. Однако при расчёте по модели K&I (см. *рис. 3б*), а также при использовании в дополнение регионального алгоритма для КХЛ (см. *рис. 3в*) в этих точках обнаруживаются адекватные значения, лежащие в области допустимой погрешности (на *рис. 3б* и *в* отображаются только две точки из четырёх, поскольку не для всех точек спутниковые данные содержат значения КХЛ). На *рис. 3а* видно, что коэффициент  $R^2$  между измеренными концентрациями ПП и значениями ПП, рассчитанным по спутниковым данным согласно VGPM, составляет 0,78, что указывает на возможную значимую связь между параметрами, но при этом значения, полученные по модели, сильно завышены по сравнению с измеренными показателями ПП. На *рис. 3б* представлено аналогичное сравнение, однако для модели K&I, здесь коэффициент  $R^2$  ниже — 0,32, но значения по модели более приближены к измеренным. На *рис. 3в* видно, что при расчёте по модели K&I с использованием в дополнение регионального алгоритма для КХЛ  $R^2$  стал выше — 0,51. Вместе с тем следует отметить, что завышение значений концентраций минимально по сравнению с данными *рис. 3б*, что указывает на необходимость внесения корректировок в используемую модель, учитывая региональные особенности акватории.

В результате проведённой работы было показано, что модель VGPM малоприменима в исследуемых водах при использовании как спутниковых данных, так и данных судовых измерений. Выявлены следующие причины. Во-первых, ранее С. Захарков с коллегами (2014) доказали необходимость коррекции спутниковых оценок КХЛ в прибрежной зоне северо-западной части Японского моря, основываясь на судовых измерениях. Было показано, что недостаточная точность VGPM-модели связана в первую очередь с переоценкой КХЛ, входящего в модель в прибрежных водах второго типа (залив Петра Великого). Для преодоления этого недостатка необходима разработка регионального спутникового алгоритма для КХЛ в целях исключения возможных неверных решений (Remote..., 2000). В настоящей работе используется региональный алгоритм КХЛ в Японском море, описанный в статье (Салюк и др., 2013).

Во-вторых, низкая точность стандартной VGPM-модели может быть связана с ошибками параметра  $P_{bopt}$ , который входит в модель, ввиду сложности однозначной его интерпретации. Зависимость этого параметра от суточного освещения, преобладания видов фитопланктона, адаптации к слабому и сильному освещению, типа морских вод и других характеристик влияет на точность его определения (Milutinović, Bertino, 2011). Авторами предлагается использовать прямые измерения ассимиляционного числа для последующей корректировки.

## Заключение

В результате рассмотрения возможности применения моделей VGPM и K&I для расчёта ПП в прибрежных водах северо-западной части Японского моря были сделаны следующие выводы:

1. Для всех моделей требуется описание комплекса факторов, влияющих на ежедневные изменения  $P_{bopt}$ . Это необходимо для понимания роли данного параметра в формировании величины ПП и его качественной и количественной связи с основными компонентами морской среды. Точность параметра  $P_{bopt}$  важна для определения ПП в изучаемой акватории.
2. Необходимо учитывать региональные особенности акватории. В частности, свойства вод второго оптического типа, фотосинтетические характеристики фитопланктона и погрешности оценок спутниковыми сканерами.
3. Некоторые недостатки моделей, выявленные в ходе работы, могут быть разрешены разработкой региональных алгоритмов для расчёта КХЛ и ПП в исследуемой акватории. За основу можно взять подход, использованный в модели K&I. Данные, полученные с помощью этой спутниковой модели, более приближены к судовым значениям.

4. Для лучшего понимания проблем, связанных с ошибками спутниковой информации в исследуемом районе, необходимо располагать более обширным набором данных. С этой целью авторы планируют в последующей работе участие в морских экспедициях в северо-западной части Японского моря.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-31219 мол\_а и 15-35-21032 мол\_а\_вед) в рамках государственной бюджетной темы (рег. № АААА-А17-117030110037-8).

## Литература

1. Ведерников В. И., Коновалов Б. В., Кобленц-Мишке О. И. Результаты применения спектрофотометрического метода определения феофитина-а в пробах морской воды. // Тр. ИОАН СССР. М., 1973. Т. 95. С. 138–146.
2. Захарков С. П., Шамбарова Ю. В., Гордейчук Т. Н., Стоник И. В., Штрайхерт Е. А. Возможность использования данных зонда SBE для калибровки спутниковых данных концентрации хлорофилла а в Японском море // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2014. Т. 177. С. 209–218.
3. Захарков С. П., Владимиров А. С., Штрайхерт Е. А., Ши С., Гладких Р. В., Бузолёва Л. С. Продукционные характеристики бактерий и фитопланктона в весенне-летний период в Охотском и Беринговом морях // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 364–372.
4. Зуенко Ю. И. Промысловая океанология Японского моря: монография. Владивосток: ТИНРО-центр, 2008. 227 с.
5. Кобленц-Мишке О. И. Экстрактный и безэкстрактный методы определения фотосинтетических пигментов в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. М.: Наука, 1983. С. 114–125.
6. Ковалева И. В. Сравнение алгоритмов расчета первичной продукции Черного моря по концентрации хлорофилла в поверхностном слое, интенсивности солнечной радиации и температуре // Морской эколог. журн. 2010. Т. 9. № 2. С. 62–73.
7. Лобанова П. В., Звалинский В. И., Тищенко П. Я. Первичная продукция фитопланктона и концентрация хлорофилла-а в западной части Японского моря по спутниковым и натурным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 135–147.
8. Салюк П. А., Стёпочкин И. Е., Голик И. А., Букин О. А., Павлов А. Н., Алексанин А. И. Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ для Дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 45–45.
9. Сорокин Ю. И. Первичная продукция в Охотском море // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. М.: Изд-во ВНИРО, 1997. С. 103–110.
10. An N. T., Son V. D. Primary production models and the problem of estimation of their parameters in various conditions of the water column // Russian J. Marine Biology. 2010. V. 36. No. 2. P. 139–146.
11. Behrenfeld M. J., Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnology and Oceanography. 1997. V. 42. No. 1. P. 1–20.
12. Gordon H. R., McCluney W. R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Applied Optics. 1975. V. 14. P. 413–416.
13. Kameda T., Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing // J. Oceanography. 2005. V. 61. No. 4. P. 663–672.
14. Kim S.-W., Saitoh S.-I., Ishizaka J., Isoda Y., Kishino M. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images // J. Oceanography. 2000. V. 56. No. 5. P. 527–538.
15. Lee Y. J., Matrai P. A., Friedrichs M. A., Saba V. S., Ardyna D. A. M., Asanuma I., Marcel Bélanger B. S., Benoît-Gagné M., Devred M., Fernández-Méndez M., Gentili B., Hirawake T., Kang S.-H., Kameda T., Kattlein C., Lee S. H., Lee Z., Mélin F., Scardi M., Tim J., Tang S. S., Turpie K. R., Waters K. J., Westberry T. K. An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color / in situ chlorophyll-a based models // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 20. No. 9. P. 6508–6541.
16. Milutinović S., Bertino L. Assessment and propagation of uncertainties in input terms through an ocean-color-based model of primary productivity // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 8. P. 1906–1917.

17. Mueller J. L., Curtiss D., Arnone R., Frouin R., Carder K. Above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols // *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation*. 2003. V. 30. P. 21–30.
18. Olita A., Sorgente R., Ribotti A., Fazioli L., Perill A. Pelagic primary production in the Algero-Provencal Basin by means of multisensor satellite data: focus on interannual variability and its drivers // *Ocean Dynamics*. 2011. V. 61. No. 7. P. 1005–1016.
19. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters IOCCG Report No. 3 / Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group; ed. Sathyendranath S. 2000. 140 p.
20. Silsbe G. M., Behrenfeld M. J., Halsey K. H., Milligan A. J., Westberry T. K. The CAFE model: A net production model for global ocean phytoplankton // *Global Biogeochemical Cycles*. 2016. V. 30. No. 12. P. 1756–1777.
21. Tripathy S. C., Ishizaka J., Siswanto E., Shibata T., Mino Y. Modification of the vertically generalized production model for the turbid waters of Ariake Bay, southwestern Japan // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2012. V. 97. P. 66–77.
22. Yoon J. E., Park J., Yoo S. Comparison of primary productivity algorithms for Korean waters // *Ocean Science J*. 2012. V. 47. No. 4. P. 473–487.

## Verification of VGPM and K&I models of primary production in the northwestern part of the Japan Sea using shipboard and satellite data

Yu. V. Shambarova, I. E. Stepochkin, S. P. Zakharkov

*V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*  
*E-mail: shambarova@poi.dvo.ru*

Presented study examines the possibility of use of the VGPM and K&I models of net primary production (PP) in the coastal water areas of the North-Western Japan Sea. Field measurements of PP and other bio-optical parameters of water were taken. *In situ* data include concentrations of chlorophyll *a* (CHL) and NPP, obtained with a reference methods, as well as sea surface temperature (SST), photosynthetically active radiation (PAR) at the surface and euphotic depth (*Ze<sub>u</sub>*), obtained with a submersible profiler. Also data of remote sensing reflectance spectra (RRS), obtained with a portable spectroradiometer ASD FieldSpec HandHeld throughout the ship's route was used. Comparison with a data of ocean color satellite scanner MODIS-Aqua (CHL, PAR, SST, NPP, *Ze<sub>u</sub>*; Level-3, 4-km regular grid) was held. Shortcomings of VGPM and K&I models were shown and some approaches for elaboration of regional model of NPP were offered. It's necessary to consider the water area's regional specialties and features of Case-2 waters, photosynthetic patterns of phytoplankton and estimation errors of satellite scanners in particular.

**Keywords:** net primary production, phytoplankton, ocean remote sensing, VGPM, chlorophyll *a*

Accepted: 18.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-186-195

## References

1. Vedernikov V. I., Konovalov B. V., Koblents-Mishke O. I., Rezul'taty primeneniya spektrofotometricheskogo metoda opredeleniya feofitina-a v probakh morskoi vody (Results of application of spectrophotometric method of pheophytin-a determination in sea water samples), *Trudy IOAN SSSR*, Moscow, 1973, Vol. 95, pp. 138–146.
2. Zakharkov S. P., Shambarova Yu. V., Gordeichuk T. N., Stonik I. V., Shtraikhert E. A., Vozmozhnost' ispol'zovaniya dannykh zonda SBE dlya kalibrovki sputnikovykh dannykh kontsentratsii khlorofilla *a* v Yaponskom



- more (Possibility of using SBE profilometer data for calibration of satellite data on concentration of chlorophyll *a* in the Japan Sea), *Izvestiya TINRO*, 2014, Vol. 177, pp. 209–218.
3. Zakharkov S. P., Vladimirov A. S., Shtraikhert E. A., Shi S., Gladkikh R. V., Buzoleva L. S., Produktsionnye kharakteristiki bakterii i fitoplanktona v vesenne-letnii period v Okhotskom i Beringovom moryakh (Production characteristics of bacteria and phytoplankton in the Sea of Okhotsk and Bering Sea during spring–summer), *Mikrobiologiya*, 2017, Vol. 86, No. 3, pp. 364–372.
  4. Zuenko Yu. I., *Promyslovaya okeanologiya Yaponskogo morya* (Fisheries Oceanography of the Japan Sea), Vladivostok: TINRO-tsentr, 2008, p. 227.
  5. Koblents-Mishke O. I., *Ekstraktnyi i bezekstraktnyi metody opredeleniya fotosinteticheskikh pigmentov v probe* (Extractive and non-extractive methods for determining photosynthetic pigments in the sample), *Sovremennye metody kolichestvennoi otsenki raspredeleniya morskogo planktona*, Moscow: Nauka, 1983, pp. 114–125.
  6. Kovaleva I. V., Svravnenie algoritmov rascheta pervichnoi produktsii Chernogo morya po kontsentratsii khlorofilla v poverkhnostnom sloe, intensivnosti solnechnoi radiatsii i temperatury (Comparison of calculation algorithms of primary production in the Black Sea on concentration of chlorophyll in surface layer, to intensity radiation of sun and temperature), *Morskoi ekologicheskii zhurnal*, 2010, Vol. 9, No. 2, pp. 62–73.
  7. Lobanova P. V., Zvalinskii V. I., Tishchenko P. Ya., Pervichnaya produktsiya fitoplanktona i kontsentratsiya khlorofilla-a v zapadnoi chasti Yaponskogo morya po sputnikovym i naturnym dannym (Primary production of phytoplankton and concentration of chlorophyll-a in the western part of the Japan/East Sea from remote sensing and field data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 135–147.
  8. Salyuk P. A., Steepochkin I. E., Golik I. A., Bukin O. A., Pavlov A. N., Aleksanin A. I., Razrabotka empiricheskikh algoritmov vosstanovleniya kontsentratsii khlorofilla-a i okrashennykh rastvorenykh organicheskikh veshchestv dlya Dal'nevostochnykh morei iz distantsionnykh dannykh po tsvetu vodnoi poverkhnosti (Development of empirical algorithms for chlorophyll a and colored dissolved organic matter concentrations estimation from water remote sensed data in the Far Eastern Seas), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 3, pp. 45–45.
  9. Sorokin Yu. I., Pervichnaya produktsiya v Okhotskom more (Primary production in the Sea of Okhotsk), In: *Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Okhotskogo morya* (Complex Studies of Ecosystem of the Sea of Okhotsk), Moscow: Izd. VNIRO, 1997, pp. 103–110.
  10. An N. T., Son V. D., Primary production models and the problem of estimation of their parameters in various conditions of the water column, *Russian J. Marine Biology*, 2010, Vol. 36, No. 2, pp. 139–146.
  11. Behrenfeld M. J., Falkowski P. G., Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 1997, Vol. 42, No. 1, pp. 1–20.
  12. Gordon H. R., McCluney W. R., Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing, *Applied Optics*, 1975, Vol. 14, pp. 413–416.
  13. Kameda T., Ishizaka J., Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing, *J. Oceanography*, 2005, Vol. 61, No. 4, pp. 663–672.
  14. Kim S.-W., Saitoh S.-I., Ishizaka J., Isoda Y., Kishino M., Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images, *J. Oceanography*, 2000, Vol. 56, No. 5, pp. 527–538.
  15. Lee Y. J., Matrai P. A., Friedrichs M. A., Saba V. S., Ardyna D. A. M., Asanuma I., Marcel Bélanger B. S., Benoît-Gagné M., Devred M., Fernández-Méndez M., Gentili B., Hirawake T., Kang S.-H., Kameda T., Katlein C., Lee S. H., Lee Z., Mélin F., Scardi M., Tim J., Tang S. S., Turpie K. R., Waters K. J., Westberry T. K., An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-a based models, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, No. 9, pp. 6508–6541.
  16. Milutinović S., Bertino L., Assessment and propagation of uncertainties in input terms through an ocean-color-based model of primary productivity, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 8, pp. 1906–1917.
  17. Mueller J. L., Curtiss D., Arnone R., Frouin R., Carder K., Above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols, *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation*, 2003, Vol. 30, pp. 21–30.
  18. Olita A., Sorgente R., Ribotti A., Fazioli L., Perill A., Pelagic primary production in the Algero-Provencal Basin by means of multisensor satellite data: focus on interannual variability and its drivers, *Ocean Dynamics*, 2011, Vol. 61, No. 7, pp. 1005–1016.
  19. *Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. IOCCG Report No. 3*, Sathyendranath S. (ed.), 2000, 140 p.

20. Silsbe G. M., Behrenfeld M. J., Halsey K. H., Milligan A. J., Westberry T. K., The CAFE model: A net production model for global ocean phytoplankton, *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, Vol. 12, pp. 1756–1777.
21. Tripathy S. C., Ishizaka J., Siswanto E., Shibata T., Mino Y., Modification of the vertically generalized production model for the turbid waters of Ariake Bay, southwestern Japan, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, Vol. 97, pp. 66–77.
22. Yoon J. E., Park J., Yoo S., Comparison of primary productivity algorithms for Korean waters, *Ocean Science J.*, 2012, Vol. 47, No. 4, pp. 473–487.