

УДК 573.22.087:574.5

В.И. Звалинский¹, П.В. Лобанова², П.Я. Тищенко¹, В.Б. Лобанов^{1*}¹ Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;² Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ СУДОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Проанализированы судовые и спутниковые данные 38 станций, выполненных в северо-восточной части Японского моря в 46-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в период с 9 по 19 июля 2009 г. Для анализа использованы *in situ* данные STD-зондирования, хлорофилла *a* и концентрации биогенных веществ (соединения фосфора — анионы ортофосфорной кислоты, P, азота — NO₂ + NO₃, кремния — Si и неорганического углерода — DIC). Спутниковые данные цвета океана взяты из базы данных Climate Change Initiative Ocean Colour (CCI-OC), версия 2. Среднее содержание хлорофилла *a* в первом оптическом слое по судовым и спутниковым данным было достаточно близким — 0,384 ± 0,160 мг/м³ (судовые оценки) и 0,406 ± 0,120 мг/м³ (спутниковые оценки), в то время как величины интегральной первичной продукции в фотическом слое различались почти в 2 раза — 1450 ± 430 мгС/(м² · сут) (судовые оценки) и 770 ± 190 мгС/(м² · сут) (спутниковые оценки). Судовые данные вертикальных профилей биогенных веществ и хлорофилла *a* показали, что их основная масса была сосредоточена в слое от 20 до 40 м, где и формируется основная органическая продукция. Однако этот главный продукционный слой недоступен наблюдению со спутника, чем и обусловлена низкая величина первичной продукции по спутниковым данным. Получена весьма низкая степень корреляции судовых и спутниковых величин первичной продукции, что является следствием низкой точности спутниковых оценок в стратифицированных водах.

Ключевые слова: хлорофилл, эвфотический слой, фотосинтез, судовые и спутниковые данные первичной продукции, северная часть Японского моря.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-195-184-200.

Zvalinsky V.I., Lobanova P.V., Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B. Evaluation of primary production in the northeastern Japan Sea on the base of shipboard and satellite data // *Izv. TINRO*. — 2018. — Vol. 195. — P. 184–200.

Satellite data on chlorophyll concentration from ESA (CCI-OC) and Goddard Space Flight Center, NASA and shipboard observations of CTD, P, N, Si, inorganic carbon, DCI,

* Звалинский Владимир Иванович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, e-mail: biomar@mail.ru; Лобанова Полина Вячеславовна, ассистент кафедры, e-mail: p.lobanova@spbu.ru; Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: travel@poi.dvo.ru; Лобанов Вячеслав Борисович, кандидат географических наук, директор, e-mail: lobanov@poi.dvo.ru.

Zvalinsky Vladimir I., D.Sc., principal researcher, e-mail: biomar@mail.ru; Lobanova Polina V., assistant, e-mail: p.lobanova@spbu.ru; Tishchenko Pavel Ya., D.Sc., head of laboratory, e-mail: travel@poi.dvo.ru; Lobanov Vyacheslav B., Ph.D., director, e-mail: lobanov@poi.dvo.ru.

and Chl *a* at 38 stations in the northeastern Japan Sea (46th cruise of RV Akademik M.A. Lavrentyev on July 9–19, 2009) are analyzed. The highest chlorophyll concentrations were found in the subsurface layer (depth 20–40 m) or even deeper in the Polar Front zone, so they were not reflected in the satellite data. The minimal depths of the subsurface maximum were observed northward from the Polar Front where the estimations of chlorophyll concentration in the upper optical layer ($Z_d = 1/kd$) were similar for the shipboard and satellite measurements (on average 0.384 ± 0.160 mg/m³ and 0.406 ± 0.120 mg/m³, respectively). Primary production was calculated using the assimilation number 4.46 mgC/mgChl per hour. Depth of euphotic layer was estimated using the vertical profiles of nutrients and Chl *a*. Within this layer, the primary production in the northeastern Japan Sea was evaluated for the shipboard stations as $895\text{--}2275$ mgC·m⁻²·day⁻¹, on average 1450 ± 430 mgC·m⁻²·day⁻¹, and for the satellite data on average 770 ± 190 mgC·m⁻²·day⁻¹. The estimations based on the shipboard and satellite data were weakly correlated. The shipboard estimations exceed considerably the results obtained by Koblents-Mishke et al. (1956, 1970) and Yamada et al. (2005). Poor accuracy of satellite estimations of primary production is concluded because the deeper part of the euphotic layer with the maximum concentration of chlorophyll is in shadow for satellite sensors.

Key words: chlorophyll, euphotic zone, photosynthesis, shipboard observations, satellite data, primary production, northern Japan Sea.

Введение

Исследования первичной продукции (ПП) в северной части Тихого океана начались Институтом океанологии им. П.П. Ширшова в начале 60-х гг. 20-го века на НИС «Витязь» методом радиоуглеродной метки C¹⁴. По результатам этих работ была создана карта пространственного распределения ПП на основе 7000 измерений, выполненных в различных районах Мирового океана, в том числе и в Японском море (Кобленц-Мишке, 1965; Кобленц-Мишке и др., 1970; Кобленц-Мишке, Ведерников, 1977). Из этих данных следует, что ПП северной части Японского моря превышала 500 мгC/(м² · сут), а южной — $250\text{--}500$ мгC/(м² · сут). Позже годовая ПП Японского моря была оценена в пределах $75\text{--}200$ гC/м² (Yamada et al., 2005). Для акватории Цусимской котловины на основе экспедиционных исследований было установлено, что ПП находится в пределах $172\text{--}358$ гC/(м² · год) (Choi et al., 2016). В период с 1998 по 2002 г. впервые были оценены пространственная и временная изменчивость ПП на 13 станциях Японского моря на основании спутниковых данных SeaWiFS с использованием модели VGPM (Vertically Generalized Production Model) (Behrenfeld and Falkowski, 1997a, b). Одновременные судовые и спутниковые измерения в 4 районах Японского моря показали хорошую корреляцию между двумя подходами оценки ПП, при этом годовая ПП у берегов России (Татарский пролив), в центральном, юго-восточном и юго-западном районах Японского моря составляла соответственно 170, 162, 191 и 222 гC/м² (Yamada et al., 2005).

Анализ спутниковых данных ПП из базы Ocean Productivity с 2003 по 2012 г. показал, что ее наибольшее среднегодовое значение в Японском море наблюдалось в 2009 и 2004 гг. (811 и 789 мгC/(м² · сут)), а наиболее низкие величины ПП (654 и 687 мгC/(м² · сут)) отмечались в 2005 и 2012 гг., при этом среднее значение за весь период составило 742 мгC/(м² · сут) (Шамбарова и др., 2015). Наибольшие значения ПП ($800\text{--}1200$ мгC/(м² · сут)) наблюдались в южной части Японского моря, а наименьшие — в его северной части ($400\text{--}600$ мгC/(м² · сут)).

По аналогии с другими морскими акваториями умеренных широт динамика ПП Японского моря была сформулирована на основе представлений о весеннем (становление стратификации) и осеннем (разрушение стратификации) «цветении» фитопланктона и концепции глубины критического слоя (ГКС), когда суммарная продукция перемешиваемого слоя равна нулю (Sverdrup, 1953). В соответствии с этим подходом весной «цветение» фитопланктона начинается тогда, когда глубина перемешиваемого слоя (ГПС) становится меньше ГКС, а осеннее «цветение» завершается, когда ГПС превышает ГКС. Развитие весеннего и осеннего «цветения» фитопланктона разных акваторий Японского моря имеет свои особенности, и в соответствии с ними море было разделено на 4 акватории: юго-восточную, юго-западную, северо-восточную и

северо-западную (Kim et al., 2000). Для этого сезонная динамика хлорофилла *a* (Хл) оценивалась с использованием спутниковых данных CZCS (Coastal Zone Colour Scanner ИСЗ Nimbus-7) за период 1978–1986 гг. Весеннее «цветение» в центральной части Японского моря, по нашему мнению, начинается в феврале-марте, в южной части — в апреле. Затем «волна цветения» продвигается на север, где оно происходит в мае. В это время у берегов России концентрация Хл превышает 1 мг/м^3 , затем содержание Хл резко падает и достигает минимума в августе-сентябре. Осенью в восточной части Японского моря содержание Хл увеличивается от сентября к октябрю с пиком в ноябре. В сентябре в северо-западной части моря концентрация Хл медленно увеличивается, и пик проходит в декабре. Осеннее «цветение» по всей акватории моря заканчивается в ноябре-декабре, когда ГПС становится больше ГКС. С использованием спутниковых данных А.И. Абакумов и Ю.Г. Израильский (2013) оценили содержание Хл в столбе воды в зал. Петра Великого от 40 (декабрь-январь) до 120 мг Хл/м^2 (май-июнь).

При использовании дистанционных методов основной проблемой становится вопрос о том, насколько точно они отражают судовые измерения *in situ*. Ранее (Banse, Postel, 2003) обнаружено, что для различных районов Тихого океана в 9 из 10 случаев степень корреляции между *in situ* параметрами Хл, ПП и аналогичными данными спутниковых наблюдений низка. Существует несколько причин расхождения между спутниковыми результатами и данными судовых наблюдений. К ним можно отнести состояние атмосферы на момент наблюдений (характер и концентрация аэрозоля), гидрологические особенности моря в данной акватории (мезомасштабные структуры, вертикальная стратификация вод и связанная с ней ГПС), а также фотосинтетическую активность фитопланктонных сообществ, которая чаще всего выражается через ассимиляционное число, P^b .

Очевидно, что качество спутниковых данных цвета океана можно оценить только сравнением с одновременными судовыми измерениями *in situ*. Анализ измерений со спутниковых сканеров OCTS (Ocean Color Temperature Scanner), SeaWiFS, MODIS Aqua и MERIS показал, что между спутниковыми данными ПП и соответствующими измерениями *in situ* в целом наблюдается корреляция, которая составляет около 47 % (Murakami et al., 2006). Исследователи сходятся во мнении, что для получения корректных оценок спутниковые наблюдения Хл и ПП в океане должны подкрепляться измерениями *in situ*. Помимо влияния объективных факторов на спутниковые оценки ПП в океане существенное влияние оказывает субъективный фактор — выбор и использование математической модели восстановления ПП в море, однако дальнейшее развитие моделей ограничивается недостатком объема измерений *in situ* для их валидации (Carr et al., 2006).

Таким образом, вопрос о корреляции между *in situ* измерениями и спутниковыми наблюдениями Хл и ПП не является решенным как для Мирового океана в целом, так и для Японского моря в частности.

Ранее (Звалинский и др., 2006) нами были проведены измерения содержания биогенных элементов, Хл и величины ПП (радиоуглеродным методом) в столбе воды в северо-западной части Японского моря по результатам экспедиции на НИС «Профессор Гагаринский» в осенний период (12.10–03.11) 2000 г. Содержание Хл в фотическом слое варьировало от 11 до 30 мг/м^2 , а интегральная ПП — от 120 до $520 \text{ мгС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Величина P^b изменялась в пределах 1,4–3,3 (среднее — $2,46 \text{ мгС}/(\text{мгХл} \cdot \text{ч})$). За период с 18 по 30 октября 2000 г. в результате осеннего охлаждения и ветрового перемешивания произошло уменьшение статической устойчивости столба воды (в 1,6–2,5 раза), вследствие чего увеличилось снабжение фотического слоя биогенными элементами и величины ПП в 1,2 раза, несмотря на заметное уменьшение дневной дозы света.

В период с 7 по 18 мая 2004 г. нами проведены наблюдения на 45 станциях, выполненных в северо-западной части Японского моря в рейсе № 33 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (La33). Содержание Хл в первом оптическом слое составило по судовым данным $0,55 \pm 0,58 \text{ мг/м}^3$, по спутниковым — почти вдвое выше, $0,95 \pm 0,36 \text{ мг/м}^3$. Корреляция между судовыми и спутниковыми данными практически не наблюдалась

($r^2 < 0,01$). Одной из причин завышения спутниковых оценок может быть влияние в атмосфере аэрозолей, принесенных в Японское море в весенний сезон с пустынных регионов Китая и Монголии (Zhao et al., 2003). Другая причина низкой корреляции между этими данными то, что основная масса Хл была сосредоточена на глубине 20–50 м, тогда как спутнику были доступны глубины менее 15 м. Величины ПП в рейсе La33 составили по судовым измерениям 1870 ± 900 мгС/(м² · сут), по спутниковым данным эта величина была почти в 1,5 раза ниже — 1226 ± 432 мгС/(м² · сут), корреляция судовых и спутниковых величин ПП также была низкой ($r^2 \approx 0,17$). Низкая степень корреляции судовых и спутниковых величин Хл и ПП, очевидно, является следствием низкой точности спутниковых оценок в стратифицированных водах (Лобанова и др., 2017).

Ранее нами были рассмотрены осенние и весенние условия формирования продукции в северной части Японского моря. В данной работе проводится сравнение судовых и спутниковых оценок биооптических свойств воды, содержания Хл в толще фотического слоя и ПП в северо-восточной части Японского моря (38–46° с.ш. 130–142° в.д.) в летний период 2009 г. Делаются выводы о возможных причинах различий между оценками ПП на основе спутниковой и судовой информации.

Материалы и методы

Судовые данные. В работе проанализированы данные рейса № 46 ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (в дальнейшем — La46). В экспедиции La46 выполнено 38 станций в период с 9 по 19 июля 2009 г., все станции объединены в 4 разреза (рис. 1). Для анализа использованы *in situ* данные СТД-зондирований, концентрации биогенных веществ (БВ) — фосфатов (P), соединений азота (NO₃+NO₂), силикатов (Si), неорганического углерода (DIC) — и хлорофилла *a*, измеренных по методикам ВНИРО

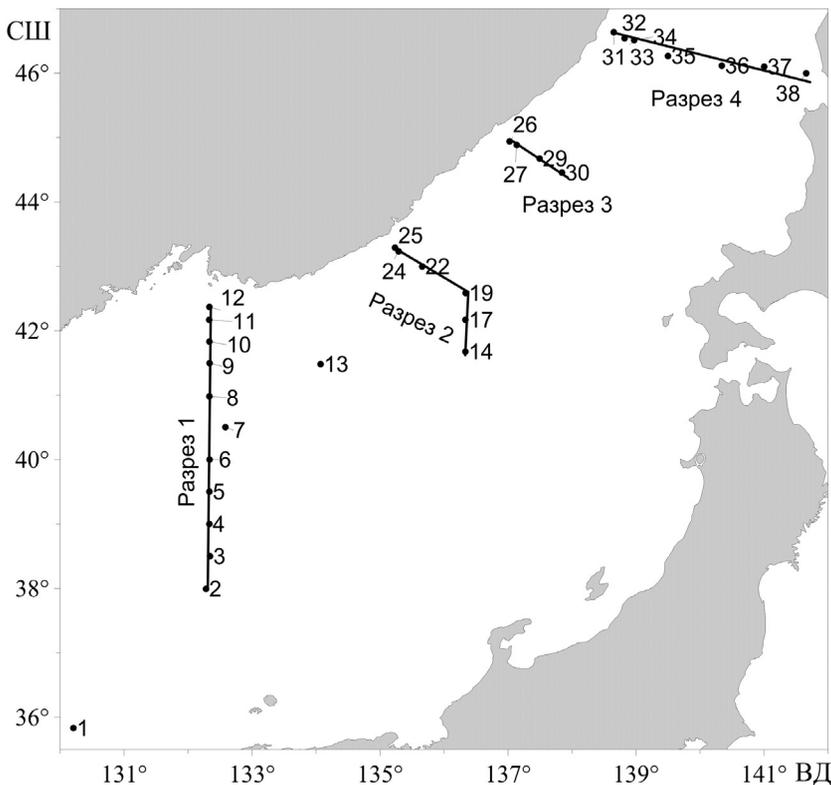


Рис. 1. Расположение станций в 46-й экспедиции ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Японском море в период 09–19.07.2009 г., для удобства не показаны несколько станций на 4 разрезах. В расчетах принимались во внимание все 38 станций

Fig. 1. Scheme of stations in 46th cruise of RV Akademik M.A. Lavrentyev in the Japan Sea on July 9–19, 2009

и ИОАН СССР*. Значения DIC были рассчитаны из данных pH и общей щелочности (Тищенко и др., 2011).

Спутниковые данные. В работе использованы данные цвета океана (Хл и коэффициент диффузного ослабления света на длине волны 490 нм (k_{490})) из базы CCI-OC, версия 2, представляющие собой объединённую информацию с трёх спектрорадиометров (SeaWiFS, MODIS Aqua и MERIS) с пространственным разрешением 4×4 км и временной дискретностью 1 день. Спутниковые данные дневной фотосинтетически активной радиации (ФАР), измеренные спектрорадиометром MODIS Aqua, из базы данных NASA's OceanColor Web и ПП из базы данных Ocean Productivity имеют пространственную дискретность $0,0834 \times 0,0834$ град, а временную — 8 дней. Дата, к которой привязаны данные, соответствует началу 8-дневного промежутка осреднения. Данные ПП рассчитаны с помощью модели VGPM на основе спутниковой информации о Хл, температуре поверхности воды и ФАР. Все спутниковые данные, использованные в работе, были интерполированы нами по пространству двухмерной интерполяцией в точки с координатами судовых станций.

Оценка первичной продукции. Оценка интегральной ПП в фотическом слое как мультисубстратного процесса проводилась с использованием разработанной в ТОИ ДВО РАН модели зависимости фотосинтеза от интенсивности света и других факторов среды, полученной с учетом механизма фотосинтеза (Звалинский, Литвин, 1988; Звалинский, 2006; Звалинский и др., 2006; Звалинский, Тищенко, 2016; Тищенко и др., 2017):

$$\frac{r_{IA} \cdot V}{1 - \frac{V}{I}} + \frac{r_{CA} \cdot V}{1 - \frac{V}{C}} + \frac{r_{NA} \cdot V}{1 - \frac{V}{N}} + \frac{r_{PA} \cdot V}{1 - \frac{V}{P}} = (1 - \gamma \cdot V), \quad (1)$$

где $V = P/P^m$ — относительная скорость; P и P^m — скорость и максимальная скорость процесса; $I = [I]/K_I$; $C = [C_e]/K_C$; $N = [N]/K_N$; $P = [P]/K_P$ — относительные (безразмерные) интенсивность света и концентрации субстратов (углерода, азота, фосфора) в единицах субстратных констант; $[I]$, $[C_e]$, $[N]$ и $[P]$ — абсолютные концентрации веществ; K_I , K_C , K_N и K_P — соответствующие субстратные константы, определяющие интенсивность света и скорости извлечения элементов из среды; γ — параметр непрямоугольной гиперболы, равный $\approx 0,95$ для реальных световых кривых морских водорослей; r_{ij} — относительные сопротивления взаимодействий. Первичное продуцирование, как правило, протекает при лимитировании света или какого-либо одного из БВ, и в этом случае скорость V описывается зависимостью только от одного лимитирующего фактора среды — света, углерода, азота или фосфора (Звалинский, Тищенко, 2016). Для случая лимитирования светом соотношение (1) может быть представлено в виде:

$$P = P^m \frac{1 + I/I_k}{2\gamma} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4\gamma I/I_k}{(1 + I/I_k)^2}} \right\}, \quad (2)$$

где I_k — параметр, введенный Толлингом (Talling, 1957), — световая константа, соответствующая интенсивности света, при которой световая кривая переходит к насыщению, в летнее время составляет ≈ 10 % от падающей на поверхность воды ФАР, т.е. $I_k \approx 0,1 \cdot I_0$; I_0 — поверхностная ФАР. Считается, что интенсивность света I_k — это глубина, на которой фотосинтез насыщается в полдень и соответствует ≈ 21 В/м², или $I_k \approx 100$ мкмоль квант/(м²с), а солнечная энергия на глубине фотической зоны (Z_{eu}), соответствующая 1 % поверхностной ФАР ($I_{Z_{eu}}/I_0 = 0,01$), примерно равна 1,4–1,7 В/м², или 8–10 мкмоль · квант/(м²с) (Sverdrup, 1953; Kim et al., 2000).

* Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М.: ВНИРО, 1988. 120 с.; Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИОАН им. П.П. Ширшова, 1992. 199 с.

Интенсивность ФАР экспоненциально уменьшается с глубиной (Gordon, McCluney, 1975; Ерлов, 1980):

$$I(Z)/I_k = \frac{I_0 \cdot \exp(-k_d \cdot Z)}{0,1 \cdot I_0} = 10 \cdot \exp(-4,6 \cdot Z/Z_{eu}). \quad (3)$$

Здесь Z — глубина, м; Z_{eu} — глубина фотического слоя, соответствующая 1 % проникновения ФАР, м; k_d — коэффициент диффузного ослабления света (для всего спектра ФАР), равный

$$k_d = \frac{\ln(I_0/I_{Z_{eu}})}{Z_{eu}} = \frac{\ln(I_0/0,01I_0)}{Z_{eu}} = 4,6/Z_{eu}. \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (2) по глубине фотического слоя с учетом уравнения (3) дает коэффициент 0,66. Максимальная ПП, отнесенная к единице концентрации Хл, соответствует ассимиляционному числу, которое нами измерялось в слое оптимальных условий (подповерхностный слой). Тогда уравнение для восстановления интегральной ПП через непосредственно измеряемые параметры имеет вид (Звалинский, 2006; Звалинский и др., 2006)

$$P = 0,66 \cdot P^b \cdot Chl_{eu} \cdot T_d, \quad (5)$$

где P^b — ассимиляционное число в подповерхностном слое, мгС/(мгХл · ч); Chl_{eu} — содержание Хл в фотическом слое, мг/м²; T_d — долгота дня, ч. Содержание Хл рассчитывалось для каждого горизонта по глубине в пределах фотического слоя, при этом судовые данные концентрации Хл были линейно интерполированы в горизонты с шагом 0,5 м:

$$Chl_{eu} = 0,5 \cdot \Sigma Chl(Z). \quad (6)$$

Глубина фотической зоны Z_{eu} нами оценивалась для каждой станции на основе вертикальных профилей Хл и концентраций главных БВ (рис. 2, 3). Известно, что нижняя граница глубоководного максимума Хл соответствует нижней границе фотического слоя. Одновременно на этой границе наблюдается резкое повышение содержания нитратов (формирование «нитроклина») (Painter et al., 2007; Hickman et al., 2012). Какие-либо специальные алгоритмы определения Z_{eu} с использованием вертикальных профилей хлорофилла и БВ нам неизвестны. Резкое понижение содержания Хл на нижнем горизонте глубоководного максимума, сопровождавшееся резким повышением содержания БВ (азота, фосфора и кремния), мы интерпретировали как проявление нижней границы слоя ПП или глубины фотической зоны Z_{eu} (рис. 2, 3). Большое расстояние между горизонтами отбора проб не позволяло оценить глубину Z_{eu} с достаточной точностью. Для коррекции Z_{eu} мы использовали уравнение (4), для которого k_d оценивали с помощью алгоритма, представленного ранее (Morel et al., 2007) и связывающего k_d с аналогичным параметром для длины волны 490 нм (k_{490}), определяемым со спутника.

Долгота дня и количество ФАР. Долготу дня и дневную ФАР рассчитывали с помощью основной астрономической формулы (Бартенева и др., 1971) с учетом солнечной постоянной $I_0 \approx 6$ моль · квант/(м²ч) для безоблачного неба (Kirk, 1992; см. также Звалинский, 2006; Звалинский и др., 2006; Звалинский, Тищенко, 2016). Для сравнения брали спутниковую ФАР.

Ассимиляционное число. Величина P^b , входящая в уравнение (5), была измерена методом ¹⁴С на борту судна в экспедиции La33 (07–18.05.2004) С.П. Захарковым*. Для всех станций бралось среднее значение измерений ассимиляционного числа, которое составило: $P^b = 4,46$ мгС/(мгХл · ч) (28 значений для 9 станций на горизонтах 0, 30 и 50 м). Отметим, что для июля 2015 г. в Амурском заливе (Японское море) кислородным методом измеренное P^b составило 4,3 мгС/(мгХл · ч) (Тищенко и др., 2017), что мало отличается от принятого здесь и других литературных данных (Yamada et al., 2005) значения P^b — 4,46 мгС/(мгХл · ч).

* Захарков С.П. Отчет гидробиологического отряда // Научный отчет об экспедиции ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс № 33. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2004. С. 40–47.

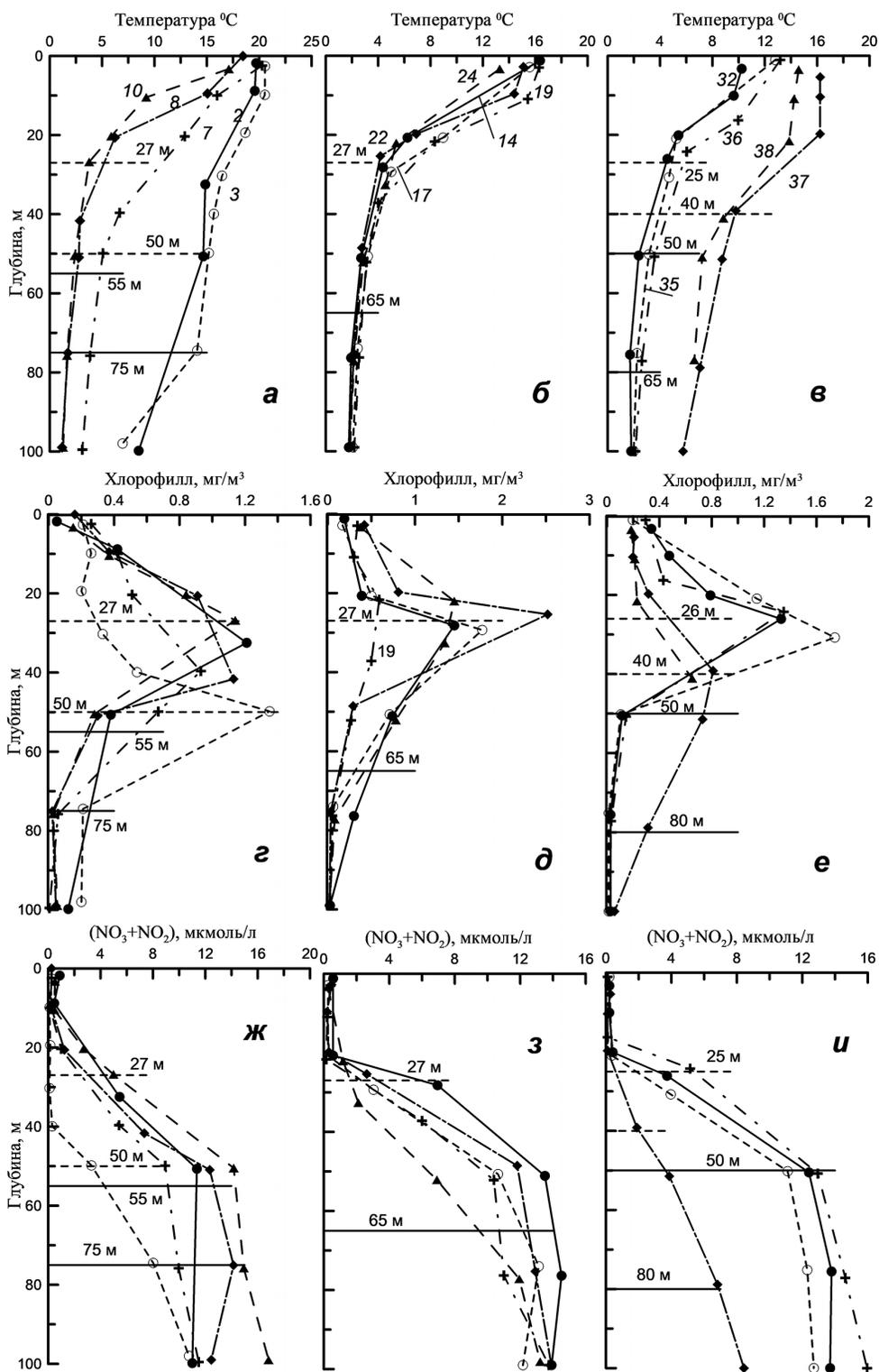


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (а–в), содержания хлорофилла (г–е) и азота (NO_2+NO_3) (ж–и) на разрезах 1 (а, г, ж), 2 (б, д, з), 4 (в, е, и) в рейсе La46, 09–19.07.2009 г. Цифры — номера станций; горизонтальные пунктирные линии указывают глубину максимумов Хл, сплошные — нижнюю границу эвфотической зоны Z_{eu}

Fig. 2. Vertical profiles of temperature (а–в) and concentrations of chlorophyll (г–е) and nitrogen (NO_2+NO_3) (ж–и) at stations of the section 1 (а, г, ж), 2 (б, д, з), and 4 (в, е, и) in the northern Japan Sea on July 9–19, 2009. Numerals — numbers of stations; horizontal dashed lines — depth of chlorophyll maximum; horizontal solid lines — the lower boundary of the euphotic zone Z_{eu}

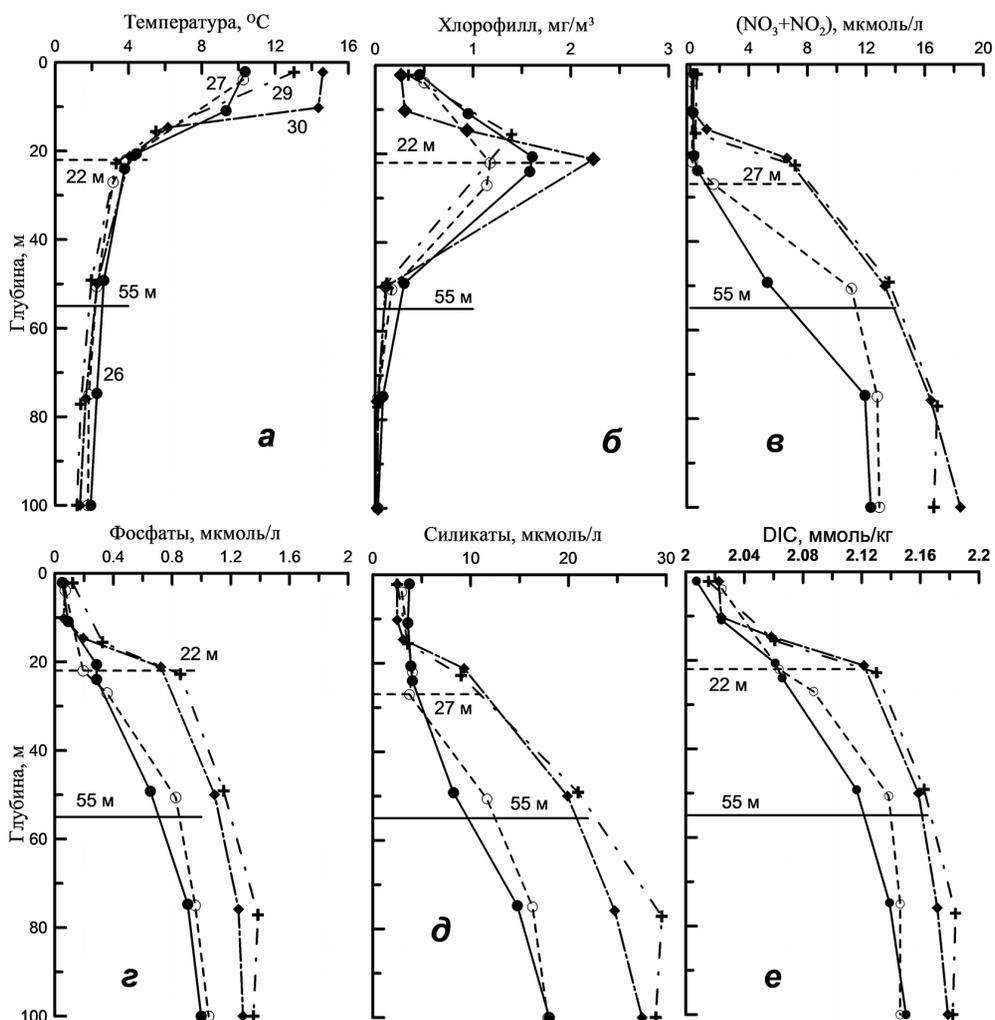


Рис. 3. Вертикальные профили температуры (а), Хл (б) и главных веществ ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$) (в), фосфатов (г), силикатов (д) и неорганического углерода (DIC) (е) на разрезе 3 (см. рис. 1). Горизонтальные пунктирные линии указывают глубину максимумов Хл, сплошные — нижнюю границу эвфотической зоны Z_{eu} .

Fig. 3. Vertical profiles of temperature (а) and concentrations of chlorophyll (б), nitrogen ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$; в), phosphate (P; г), silicone (Si; д), and inorganic carbon (DIC; е) at stations of the section 3 (see Fig. 1). Legend as for Fig. 2

Результаты и их обсуждение

Вертикальные профили температуры и продукционных характеристик. На большинстве станций наблюдается четко выраженный термоклин на глубинах 15–25 м (рис. 2, а–в и 3, а), за исключением станций, где термоклин проявляется весьма слабо (южные станции разреза 1, ст. 1–5), и на больших глубинах (восточные станции разреза 4, ст. 37, 38). На всех станциях максимум Хл расположен, как правило, на глубине нижней границы термоклина: на северных — 18–25 м, на южных — 40–50 м (ср. рис. 2, г–в, 3, б и 2, а–в, 3, а). Таким образом, положение максимума Хл заглубляется вслед за заглублением температуры.

Как и в предыдущих экспедициях (Звалинский и др., 2006, в печати), для профилей соединений азота ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) характерно весьма низкое содержание этих веществ в приповерхностном слое выше максимума Хл с последующим резким повышением концентраций с глубиной (рис. 2, ж–и и 3, в), что расценивается как «нитроклин» (Painter et al., 2007; Hickman et al., 2012). Нитроклин приурочен к положению соответствующего максимума Хл, на этой глубине происходит смена лимитирующего фактора — прекращает лимитировать азот и на-

чинает лимитировать свет. Вертикальные профили других БВ — P, Si и DIC — аналогичны профилям нитратов (рис. 3, г–е). При этом резкое повышение содержания этих веществ совпадает или весьма близко с повышением содержания нитратов (рис. 3, г–е). Этот факт указывает на то, что в верхнем продукционном слое лимитирующим может оказаться любое из перечисленных веществ.

Вертикальное и пространственное распределение Хл. Важнейшая продукционная характеристика акватории — концентрация Хл. На рис. 4, где показано пространственное распределение Хл на разных горизонтах исследуемой акватории, видно, что на глубинах 0–20 м наиболее высокие концентрации Хл наблюдаются на северных, в частности прибрежных, станциях полигона (рис. 4, а–в). Концентрации Хл на горизонте 30 м были самыми высокими (более 2 мг/м³) по сравнению с другими горизонтами и распространялись практически на всю акваторию (рис. 4, г). Исключением стали южные станции разреза 1 и восточные — разреза 4. На горизонте 50 м концентрация Хл понижалась, при этом наиболее резкое понижение наблюдалось на северных прибрежных станциях (менее 0,5 мг/м³), тогда как на южных станциях разреза 1 и восточных разреза 4 содержание Хл было выше 0,6 мг/м³ (рис. 4, д). На глубине 75 м концентрации Хл на всем полигоне были менее 0,10 мг/м³, только на юге разрезов 1 и 2 — более 0,15 мг/м³ (рис. 4, е). Этот факт указывает на то, что данная глубина была сопоставима или ниже границы фотического слоя, а наблюдаемая небольшая концентрация Хл обусловлена вертикальными динамическими процессами, которые наиболее интенсивны в районе станций 2–6.

Поскольку спутник регистрирует содержание Хл только в первом оптическом слое, обозначенное нами как Chl_d (на глубине $Z_d = 1/k_d$), этот параметр наиболее целесообразно сравнивать с аналогичными судовыми данными. Однако в июле в районе проведения работ наблюдалась высокая облачность, в связи с этим для сопоставления удалось найти данные только 6 спутниковых измерений (ст. 9 и ст. 24–28). По судовым и спутниковым данным величины Chl_d были весьма близки и составляли в среднем соответственно $0,384 \pm 0,160$ и $0,406 \pm 0,120$ мг/м³ (табл. 1).

Таблица 1
Содержание Хл в первом оптическом слое (Chl_d) и в фотическом слое (Chl_{eu}) по судовым (Суд) и спутниковым данным (Спут), мг/м³

Chlorophyll concentration (mg/m³) in the upper optical layer $Z_d = 1/k_d$ (Chl_d) and in the whole productive layer (Chl_{eu}) calculated on shipboard and satellite data

Показатель	Chl_d		Chl_{eu}
	Суд	Спут	Суд
Среднее	$0,384 \pm 0,160$	$0,406 \pm 0,120$	39 ± 10
Минимум	0,09	0,25	25
Максимум	0,75	0,55	65

Биооптические параметры (Z_{eu} и k_d) исследуемой акватории, полученные на основе судовых измерений и спутниковых данных, приводятся в табл. 2.

Таблица 2
Глубина фотической зоны Z_{eu} (м) и коэффициент диффузного ослабления света k_d (м⁻¹), полученные на основе судовых данных, СудФАР (n = 36), и спутниковых данных: k_{490} , Спут490 (n = 6) и k_d , СпутФАР (n = 6)

Depth of euphotic layer Z_{eu} (m) and diffuse attenuation coefficient k_d (m⁻¹) calculated on shipboard (СудФАР; n = 36) and satellite (k_{490} , Спут490; n = 6 and k_d , СпутФАР; n = 6) data using Morel nomogram (Morel et al., 2007)

Показатель	Z_{eu}			k_d		
	СудФАР	Спут490	СпутФАР	СудФАР	Спут490	СпутФАР
Среднее	$46,8 \pm 8,1$	42 ± 10	$35,0 \pm 7,6$	$0,100 \pm 0,204$	$0,110 \pm 0,028$	$0,131 \pm 0,033$
Минимум	28,8	20		0,075	0,064	
Максимум	62,1	61		0,160	0,204	

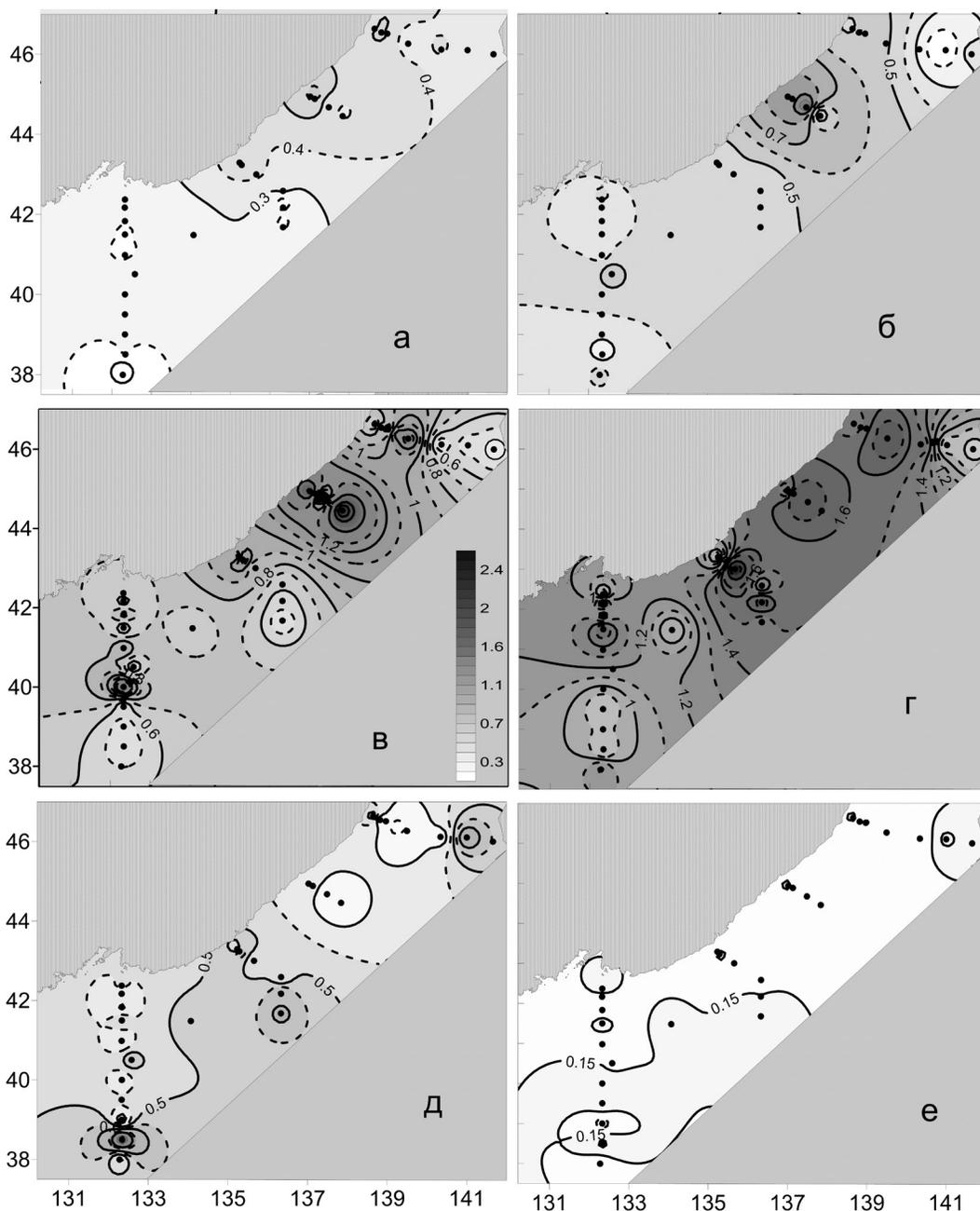


Рис. 4. Распределение хлорофилла (mgChl/m^3) на горизонтах 0 м (а), 10 м (б), 20 м (в), 30 м (г), 50 м (д) и 75 м (е) во время экспедиции La46 09–19.07.2009 г.

Fig. 4. Spatial distribution of chlorophyll (mg/m^3) at the depth 0 m (a), 10 m (б), 20 m (в), 30 m (г), 50 m (д), and 75 m (e) in the northern Japan Sea on July 9–19, 2009

Судовые и спутниковые данные по-разному характеризуют оптические параметры водной среды. Ранее (Morel et al., 2007) было установлено, что величина отношения k_d/k_{490} судовых и спутниковых коэффициентов диффузного ослабления света уменьшается от 0,70 при содержании Хл менее $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ до 0,95 при увеличении содержания Хл до $5,0 \text{ mg}/\text{m}^3$. Представленные нами номограммы позволяют оценить k_d по спутниковым измерениям через k_{490} при любом содержании Хл. Так, при содержании Хл в первом оптическом слое менее $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$, характерном для исследуемых нами вод, судовые оценки k_d практически соответствуют спутниковым

данным — $0,110-0,028 k_{490}$ (табл. 2). Необходимо отметить, что судовые и спутниковые данные k_d различаются менее чем на 10 %: $k_d \text{ СудФАР}/k_d \text{ СпутФАР} = 0,91$. По величине параметра k_d исследуемая акватория относится к типу II и III океанических вод в соответствии с классификацией Ерлова (Ерлов, 1980; Kim et al., 2000). В рейсе La46 средняя глубина СудФАР определена как $Z_{eu} \approx 46,8 \pm 8,1$ м. Насыщение фотосинтеза при реальной интенсивности света $I_0 \approx 850-900$ мкмоль · квант/(м²с) должно происходить на глубине $Z_k \approx 26$ м, что примерно соответствует глубине максимальной концентрации Хл (20–30 м, рис. 4, в, г). Похожие результаты были получены для рейса La33 (май 2004 г.). Средняя глубина Z_{eu} оценена в 46 м, и установлено, что насыщение фотосинтеза происходило на глубине $Z_k \approx 22$ м.

По судовым данным относительно высокие концентрации Хл (более 0,5 мг/м³) в первом оптическом слое наблюдаются менее чем на половине полигона в его северной части — на станциях 6, 27–30, 32 (рис. 5, а). Воды центральной части полигона содержат менее 0,5 и даже менее 0,3 мгХл/м³.

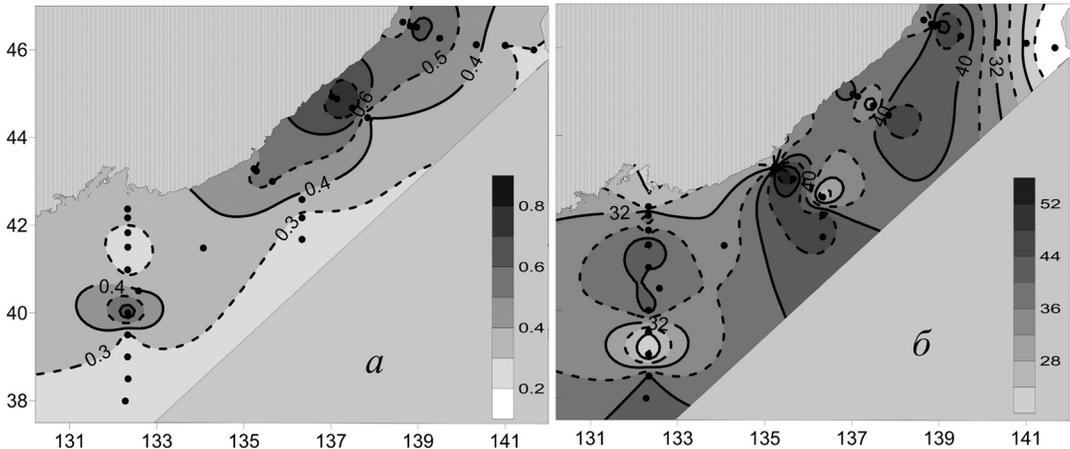


Рис. 5. Пространственное распределение содержания Хл: **а** — в верхнем оптическом слое ($Z_d = 1/k_d$), Chl_d (мг/м³); **б** — во всем фотическом слое, Chl_{eu} (мг/м³), на полигоне в экспедиции La46 согласно судовым измерениям

Fig. 5. Spatial distribution of chlorophyll in the upper optical layer $Z_d = 1/k_d$ (Chl_d ; **a**) and in the whole euphotic layer (Chl_{eu}) on shipboard data, mg/m³

В фотическом слое на большей части акватории содержание Хл варьирует в пределах 19–54 (в среднем 39 ± 10) мг/м².

Первичная продукция. Оценки ПП показывают, что в среднем судовые и спутниковые данные ПП дают соответственно 1451 ± 430 и 770 ± 190 мгС/(м² · сут), т.е. они различаются почти в 2 раза ($Z_{cp} \text{ Суд}/Z_{cp} \text{ Спут} \approx 2,0$) (табл. 3).

Таблица 3

Величина первичной продукции ПП, оцененная по судовым (Суд) и спутниковым (Спут) данным в экспедиции La46, мгС/(м² · сут)

Table 3

Primary production calculated on shipboard (Суд) and satellite (Спут) data, мгС·м⁻²·day⁻¹

Показатель	Суд	Спут
Среднее	1451 ± 430	770 ± 190
Минимум	612	470
Максимум	2190	1220

Поскольку основным параметром при оценке ПП является Хл, то ясно, что он и будет определять пространственное распределение ПП. Действительно, распределение ПП по судовым данным (рис. 6, а) и Хл в фотическом слое (см. рис. 5, б) весьма близко по форме: повышенная ПП (более 1200 мгС/(м² · сут)) наблюдается на большей части полигона (см. рис. 6).

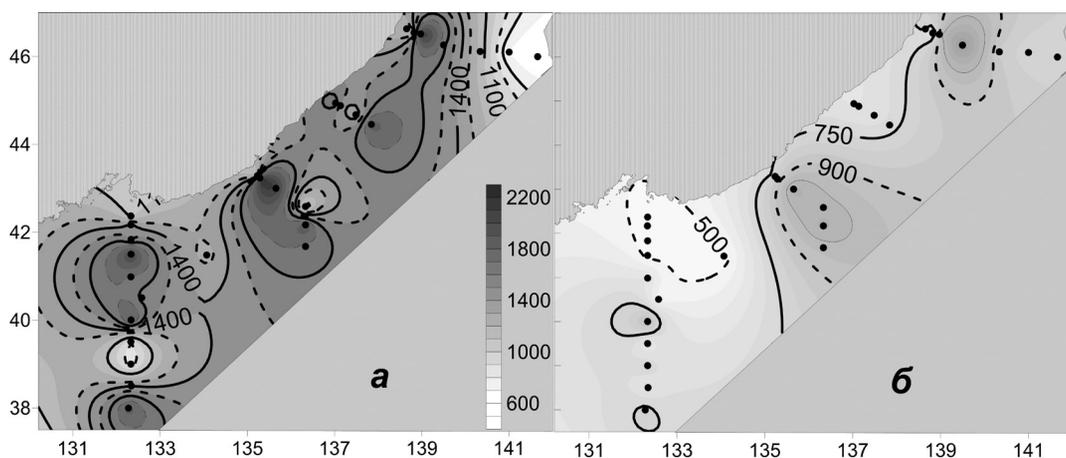


Рис. 6. Распределение первичной продукции ($\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$), оцененной на основании судовых (а) и спутниковых (б) данных во время экспедиции La46 09–19.07.2009 г.

Fig. 6. Distribution of primary production calculated on shipboard (a) and satellite (b) data, $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$

Пространственное распределение спутниковой ПП в целом показывает близкую картину. Однако величина спутниковой ПП вдвое меньше ($470 < P < 1220 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$) по сравнению с судовыми оценками ($612 < P < 2190 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$) (рис. 6, табл. 3). Как и в мае 2004 г. (Звалинский и др., в печати), основная масса Хл находилась в слое на глубине от 20 до 40 м (на этих глубинах концентрация составляла $1 > Chl > 2 \text{ mg}/\text{m}^3$; рис. 4, в, г).

Сравнение судовых и спутниковых данных. Во время экспедиции La46 спутниковые измерения были проведены в районе 6 станций. Для Хл судовые и спутниковые данные имели невысокую степень корреляции ($r^2 = 0,35$), при этом корреляция была отрицательной (рис. 7).

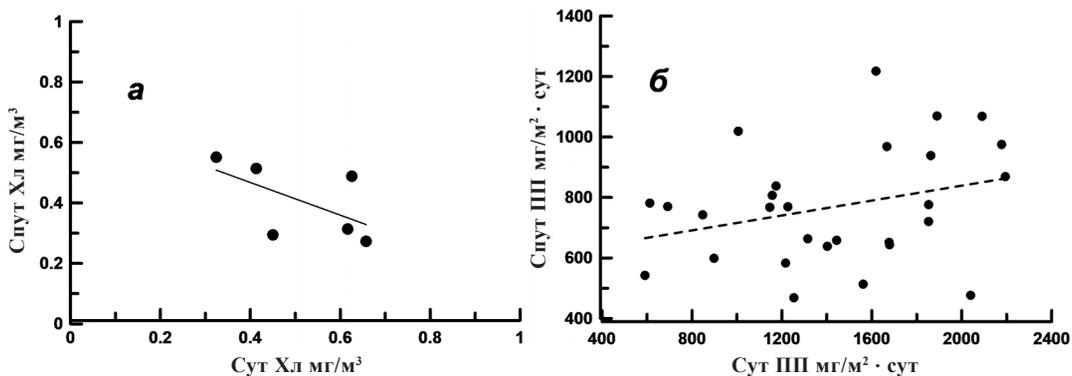


Рис. 7. Корреляционные поля судовых и спутниковых данных Хл и ПП для станций экспедиции La46: а — содержание Хл в верхнем оптическом слое, Chl_d ($Z_d = 1/k_d$, $n = 6$), $Y = -0,54 \times X + 0,68$; $r^2 = 0,35$; б — величины ПП ($n = 36$), $Y = 0,12 \times X + 590$; $r^2 = 0,09$

Fig. 7. Correlation fields between the shipboard and satellite data for chlorophyll concentration in the upper optical layer (a) and for primary production (b)

Между распределением судовой СудПП и спутниковой СпутПП также наблюдалась низкая корреляция ($r^2 \approx 0,09$; рис. 7). Такая низкая степень корреляции двух оценок ПП объясняется, в частности, отмеченной выше низкой корреляцией между судовыми и спутниковыми данными содержания Хл: основная масса Хл находилась на глубине ниже первого оптического слоя ($> 15 \text{ м}$), поэтому измерениям со спутника недоступна. Кроме этого, при оценке судовой ПП в данной работе использовалась одна величина P^b на весь полигон, тогда как при оценке ПП спутником величина P^b оценивается для каждой станции отдельно как функция поверхностной температуры (Behrenfeld and Falkowski, 1997a). Сравнение судовых и спутниковых данных ПП в различных райо-

нах Тихого океана другими исследователями (Banse, Postel, 2003) также показало их низкую корреляцию вследствие низкой точности спутниковых оценок.

Японское море характеризуется субполярным фронтом. Положение фронта имеет небольшую сезонную динамику, но в целом фронт локализован в области 40° с.ш. (Park et al., 2007). Для фронтальной области характерна высокая динамика вод. Для станций, расположенных в области фронта (ст. 6–8, см. рис. 1), характерны более глубокие залегания максимумов Хл. Станции, расположенные севернее фронта (10–12, 22–25 и 26–28), характеризуются максимумами Хл на менее глубоких горизонтах. Именно для этих станций оценки содержания Хл в первом оптическом слое по судовым и спутниковым данным были весьма близки и составляли в среднем соответственно $0,384 \pm 0,160$ и $0,406 \pm 0,120$ мг/м³. По зарубежным данным (Kim et al., 2000; Yamada et al., 2004, 2005) летом концентрация Хл уменьшается после весеннего «цветения» (апрель–май) более чем на $1,0$ мг/м³ и составляет менее $0,5$ мг/м³, что соответствует нашим судовым измерениям и спутниковым данным ($\approx 0,4$ мг/м³, см. табл. 2).

Наши исследования в северо-восточной части Японского моря показали, что в июле 2009 г. величина ПП по судовым измерениям изменялась от 895 до 2275 мг С/(м² · сут) и в среднем составляла 1450 ± 430 мгС/(м² · сут) (см. табл. 3), что примерно втрое выше значений, полученных ранее ИОАН СССР (500 мгС/(м² · сут)) (Кобленц-Мишке, 1965; Кобленц-Мишке и др., 1970), и оценок японских исследователей — 75 – 200 г С/(м² · год) (Yamada et al., 2005). При этом последними в районе полигона La46 анализировалась лишь одна станция. В нашем случае величина ПП по спутниковым данным была вдвое ниже судовых данных — 770 ± 190 мгС/(м² · сут) (табл. 3). Близкие оценки были получены на основании анализа спутниковых данных ПП из базы Ocean Productivity с 2003 по 2012 г.: среднее значение за весь период составило 742 мгС/(м² · сут) (Шамбарова и др., 2015). По мнению японских исследователей (Yamada et al., 2005), проводивших оценку пространственной и временной изменчивости ПП Японского моря на основании спутниковых данных за 1998–2002 гг. по модели VGPM, в июне величина ПП составляла ≈ 700 мгС/(м² · сут).

Осенью (12.10–03.11) 2000 г. нами впервые проведены подробные судовые исследования северной части Японского моря (Звалинский и др., 2006). Содержание Хл в фотическом слое составило от 11 до 30 мг/м², величина P^b — $1,4$ – $3,3$ (среднее — $2,46$ мгС/(мгХл · ч)), при этом интегральная ПП — от 120 до 520 мгС/(м² · сут).

Данные рейса № 33 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (La33), выполненного 7–18 мая 2004 г., полигон которого перекрывался полигоном La46, показали иную картину. Так, по судовым данным среднее содержание Хл в первом оптическом слое составило $0,63 \pm 0,38$ мг/м³, тогда как по спутниковым данным эта величина была в 1,5 раза больше — $0,95 \pm 0,36$ мг/м³; а во всем фотическом слое по судовым данным содержание Chl_{eu} , напротив, было больше (в 1,24 раза), чем по спутниковым данным. Величина ПП по судовым данным составила 1870 ± 900 , по спутниковым данным в 1,5 раза меньше — 1226 ± 432 мгС/(м² · сут). Одной из основных причин наблюдаемых различий судовых и спутниковых данных в первом оптическом слое съемки La33, по нашему мнению, является влияние аэрозолей в атмосфере в весенний сезон. В весеннее время над Японским морем при западных ветрах воздушные массы приносят с собой пыль с пустынных регионов Китая и Монголии, присутствие аэрозолей в атмосфере снижает качество спутниковых данных цвета океана, что проявляется как завышение содержания Хл (Zhao et al., 2003). Поэтому оценка спутниковой ПП, по нашему мнению, так же как и Chl_{cp} , завышена примерно в 1,5 раза, т.е. $СпутПП \approx 850$ мгС/(м² · сут). На влияние аэрозолей в атмосфере обращали внимание и другие исследователи (Kim et al., 2000). Другая причина наблюдаемых различий — динамика вод в области фронта, которая может создавать условия повышенной ПП в глубоких горизонтах фотического слоя.

Наблюдения ТОИ ДВО РАН в мае 2004 г. (Звалинский и др., в печати), в июле 2009 г. (настоящая статья) и октябре–ноябре 2000 г. (Звалинский и др., 2006) подтверждают общие закономерности формирования ПП на севере Японского моря — «цветение» весной, его затухание к лету и небольшое «цветение» осенью. Однако судовые измерения показывают, что спутниковые данные существенно занижают величину ПП.

Превышение судовых оценок в 1,5–2,0 раза над спутниковыми объясняется тем, что основная масса Хл залежала ниже первого оптического слоя, на глубине 20–40 м, и была недоступна спутниковым спектрорадиометрам.

Заключение

Полученные нами данные по содержанию Хл и величине ПП являются в значительной степени новыми. В литературе нам не встречались сведения по вертикальным профилям и разрезам Хл, БВ (соединений азота, фосфора, силикатов, DIC) и температуре для этого района и этого времени, а также пространственному распределению Хл и ПП. Приведенные данные по содержанию Хл и величине ПП в целом соответствуют известным в литературе, однако наши данные детализируют распределение этих параметров. Приведенные материалы показывают, что основная масса Хл сосредоточена в слое от 20 до 40 м, где и формируется основная продукция. Именно в этот слой происходит подток биогенных веществ, и из него они изымаются при продуцировании ОВ. По этой причине спутниковые оценки концентрации Хл и величины ПП существенно занижены.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-35-50443-мол нр, приоритетной комплексной программы РАН «Дальний Восток» (гранты № 18-1-007, № 18-1-010), программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (темы 01201363041 и 01201353055).

Список литературы

Абакумов А.И., Израильский Ю.Г. Модельный способ оценки содержания хлорофилла в море на основании спутниковой информации // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 3. — С. 473–482.

Баргенева О.Д., Полякова Е.А., Русин Н.П. Режим естественной освещенности на территории СССР : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1971. — 238 с.

Ерлов Н.Г. Оптика моря : моногр. — 2-е испр. и доп. изд. — Л. : Гидрометеиздат, 1980. — 248 с. (Пер. с англ.)

Звалинский В.И. Формирование первичной продукции в море // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 147. — С. 276–302.

Звалинский В.И., Литвин Ф.Ф. Зависимость фотосинтеза от концентрации углекислоты, интенсивности и спектрального состава света // Физиол. растений. — 1988. — Т. 35. — С. 444–457.

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. // Океанол. — 2006. — Т. 46, № 1. — С. 27–37.

Звалинский В.И., Лобанова П.В., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. Оценка первичной продукции северо-западной части Японского моря на основе судовых и спутниковых наблюдений // Океанол. (в печати).

Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // Океанол. — 2016. — Т. 56, № 4. — С. 577–591. DOI: 10.7868/S0030157416040134.

Кобленц-Мишке О.И. Величина первичной продукции Тихого океана // Океанол. — 1965. — Т. 5, № 2. — С. 325–337.

Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И. Первичная продукция // Биология океана. — М. : Наука, 1977. — Т. 2 : Биологическая продуктивность океана. — С. 183–209.

Кобленц-Мишке О.И., Волковинский В.В., Кабанова Ю.Г. Первичная продукция планктона Мирового океана // Программа и методика изучения биогеоценозов водной среды. — М. : Наука, 1970. — С. 66–84.

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 // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2017. — Т. 14, № 2. — С. 135–147. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-135-147.

Тищенко П.П., Звалинский В.И., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. Первичная продукция Амурского залива (Японское море) в летний сезон 2008 года // Биол. моря. — 2017. — Т. 43, № 3. — С. 195–202.

Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Звалинский В.И., Сергеев А.Ф. Карбонатная система Амурского залива (Японское море) в условиях гипоксии // *Океанол.* — 2011. — Т. 51, № 2. — С. 246–257.

Шамбарова Ю.В., Степочкин И.Е., Захарков С.П. Исследование изменчивости первичной продукции в Японском море по спутниковым данным на основе ЭОФ-анализа // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса.* — 2015. — Т. 12, № 1. — С. 80–92.

Banse K., Postel J.R. On using pigment-normalized, light-saturated carbon uptake with satellite-derived pigment for estimating column photosynthesis // *Global Biogeochem. Cycles.* — 2003. — Vol. 17, № 3, 1079. DOI: 10.1029/2002GB002021.

Behrenfeld M.J. and Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // *Limnol. Oceanogr.* — 1997a. — Vol. 42, № 1. — P. 1–20.

Behrenfeld M.J. and Falkowski P.G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // *Limnol. Oceanogr.* — 1997b. — Vol. 42, № 7. — P. 1479–1491.

Carr M.-E., Friedrichs M.A.M., Schmeltz M. et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color // *Deep-Sea Res. II.* — 2006. — Vol. 53. — P. 741–770. DOI: 10.1016/j.dsr2.2006.01.028.

Choi J.K., Noh J.H., Orlova T. et al. Phytoplankton and Primary Production // *Oceanography of the East Sea (Japan Sea)* / eds K.-I. Chang, C.-I. Zhang, C. Park et al. — Switzerland : Springer International Publishing, 2016. — P. 217–245. DOI: 10.1007/978-3-319-22720-7.

Gordon H.R., McCluney W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // *Appl. Opt.* — 1975. — Vol. 14, Iss. 2. — P. 413–416. DOI: 10.1364/AO.14.000413.

Hickman A.E., Moore C.M., Sharples J. et al. Primary production and nitrate uptake within the seasonal thermocline of a stratified shelf sea // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* — 2012. — Vol. 463. — P. 30–57.

Kim S.-W., Saitoh S.-I., Ishizaka J. et al. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images // *J. Oceanogr.* — 2000. — Vol. 56, Iss. 5. — P. 527–538.

Kirk J.T. The nature and measurement of the light environment in the ocean // *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea.* — N.Y. : Plenum Press, 1992. — P. 9–29.

Morel A., Huot Y., Gentili B. et al. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach // *Remote Sensing of Environment.* — 2007. — Vol. 111, Iss. 1. — P. 69–88. DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.012.

Murakami H., Sasaoka K., Hosoda K. et al. Validation of ADEOS-II GLI ocean color products using *in-situ* observations // *J. Oceanogr.* — 2006. — Vol. 62, Iss. 3. — P. 373–393.

Painter S.C., Sanders R., Poulton A.J. et al. Nitrate uptake at photic zone depths is not important for export in the subtropical ocean // *Global Biogeochem. Cycles.* — 2007. — Vol. 21, Iss. 4. GB4005. DOI: 1029/2006GB002807.

Park K.-A., Ullman D.S., Kim K. et al. Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea // *Deep-Sea Res. I.* — 2007. — Vol. 54, Iss. 4. — P. 453–470. DOI: 10.1016/j.dsr.2006.12.010.

Sverdrup H.U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* — 1953. — Vol. 18. — P. 287–295.

Talling J.F. Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation // *New Phytol.* — 1957. — Vol. 56, Iss. 1. — P. 29–50. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1957.tb07447.x.

Yamada K., Ishizaka J., Nagata H. Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002 // *J. Oceanogr.* — 2005. — Vol. 61, Iss. 5. — P. 857–869.

Yamada K., Ishizaka J., Yoo S. et al. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea (JES) // *Prog. in Oceanogr.* — 2004. — Vol. 61, Iss. 2–4. — P. 193–211. DOI: 10.1016/j.pocean.2004.06.001.

Zhao T.L., Gong S.L., Zhang X.Y., McKendry I.G. Modeled size-segregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE-Asia 2001: Implications for trans-Pacific transport // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108, № D23, 8665. DOI: 10.1029/2002JD003363.

References

Abakumov, A.I. and Izrailsky, Yu.G., Model method of vertical chlorophyll concentration reconstruction from satellite data, *Komp'yuternye Issled. Model.*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 473–482.

Barteneva, O.D., Polyakova, E.A., and Rusin, N.P., Rezhim estestvennoi osveshchennosti na territorii SSSR (Natural Illumination Regime in the USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971.

- Erlov, N.G.**, *Optika morya* (Optics of the Sea), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980.
- Zvalinsky, V.I.**, Process of primary production in the sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2006, vol. 147, pp. 276–302.
- Zvalinsky, V.I. and Litvin, F.F.**, Dependence of photosynthesis on carbon dioxide concentration, intensity and spectral composition of light, *Fiziol. Rast.*, 1988, vol. 35, pp. 444–457.
- Zvalinskii, V.I., Lobanov, V.B., Zakharkov, S.P., and Tishchenko, P.Ya.**, Chlorophyll, delayed fluorescence, and primary production in the northwestern part of the Sea of Japan, *Oceanology*, 2006, vol. 46, no. 1, pp. 23–32.
- Zvalinsky, V.I., Lobanova, P.V., Tishchenko, P.Ya., and Lobanov, V.B.**, Estimation of primary production in the northwestern Sea of Japan inferred from ship- and satellite-based observations, *Oceanology* (in press).
- Zvalinsky, V.I. and Tishchenko, P.Ya.**, Modeling photosynthesis and the growth of marine phytoplankton, *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 4, pp. 527–539. doi <https://doi.org/10.1134/S0001437016040135>
- Lobanova, P.V., Zvalinski, V.I., and Tishchenko, P.Ya.**, Primary production of phytoplankton and concentration of chlorophyll-a in the western part of the Japan/East Sea from remote sensing and field data, *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 135–147. doi 10.21046/2070-7401-2017-14-2-135-147
- Koblents-Mishke, O.I.**, Value of primary production of the Pacific Ocean, *Okeanologiya*, 1965, vol. 5, no. 2, pp. 325–337.
- Koblents-Mishke, O.I., Volkovinskii, V.V., and Kabanova, Yu.G.**, Primary production of plankton in the ocean, *Programma i metodika izucheniya biogeotsenozov vodnoi sredy* (The Program and Methods for the Study of Biogeocenoses of the Aquatic Environment), Moscow: Nauka, 1970, pp. 66–84.
- Koblents-Mishke, O.I. and Vedernikov, V.I.**, Primary production, *Biologiya okeana, T. 2: Biologicheskaya produktivnost' okeana* (Ocean Biology, vol. 2: Biological Productivity of the Ocean), Moscow: Nauka, 1977, pp. 183–209.
- Tishchenko, P.P., Zvalinsky, V.I., Tishchenko, P.Ya., and Semkin, P.Yu.**, The primary production of Amursky Bay (Sea of Japan) in the summer of 2008, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2017, vol. 43, no. 3, pp. 224–231.
- Tishchenko, P.P., Tishchenko, P.Ya., Zvalinskii, V.I., Sergeev, A.F.**, The carbonate system of Amur Bay (Sea of Japan) under conditions of hypoxia, *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 2, pp. 235–246.
- Shambarova, Yu.V., Stepochkin, I.E., Zakharkov, S.P.**, Study of the net primary production variability in the Japan Sea from satellite data using EOF-analysis, *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 80–92.
- Banse, K. and Postel, J.R.**, On using pigment-normalized, light-saturated carbon uptake with satellite-derived pigment for estimating column photosynthesis, *Global Biogeochem. Cycles.*, 2003, vol. 17, no. 3, p. 1079. doi 10.1029/2002GB002021
- Behrenfeld, M.J. and Falkowski, P.G.**, Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnol. Oceanogr.*, 1997a, vol. 42, no. 1, pp. 1–20.
- Behrenfeld, M.J. and Falkowski, P.G.**, A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models, *Limnol. Oceanogr.*, 1997b, vol. 42, no. 7, pp. 1479–1491.
- Carr, M.-E., Friedrichs, M.A.M., Schmeltz, M., Aita, M.N., Antoine, D., Arrigo, K.R., Asanuma, I., Aumont, O., Barber, R., Behrenfeld, M., Bidigare, R., Buitenhuis, E.T., Campbell, J., Ciotti A., Dierssen, H., Dowell, M., Dunne, J., Esaias, W., Gentili, B., Gregg, W., Groom, S., Hoepffner, S., Ishizaka, J., Kameda, T., Le Quere, C., Lohrenz, S., Marra, J., Melin, F., Moore, K., Morel, A., Reddy, T.E., Ryan, J., Scardi, M., Smyth, T., Turpie, K., Tilstone, G., Waters, K., and Yamanaka, Y.**, A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color, *Deep Sea Res., Part II*, 2006, vol. 53, pp. 741–770. doi 10.1016/j.dsr2.2006.01.028
- Choi, J.K., Noh, J.H., Orlova, T., Park, M.-O., Lee, S.H., Park, Y.-J., Son, S., Stonik, I., and Choi, D.H.**, Phytoplankton and primary production, *Oceanography of the East Sea (Japan Sea)*, Chang, K.-I., Zhang, C.-I., Park, C., et al. eds., Cham, Switzerland: Springer Verlag, 2016, pp. 217–245. doi 10.1007/978-3-319-22720-7
- Gordon, H.R. and McCluney, W.R.**, Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing, *Appl. Opt.*, 1975, vol. 14, no. 2, pp. 413–416. doi 10.1364/AO.14.000413
- Hickman, A.E., Moore, C.M., Sharples, J., Lucas, M.I., Tilstone, G.H., Krivtsov, V., and Holligan, P.M.**, Primary production and nitrate uptake within the seasonal thermocline of a stratified shelf sea, *Mar. Ecol.: Prog. Ser.*, 2012, vol. 463, pp. 30–57.
- Kim, S.-W., Saitoh, S.-I., Ishizaka, J., Isoda, Y., and Kishino, M.**, Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images, *J. Oceanogr.*, 2000, vol. 56, no. 5, pp. 527–538.

Kirk, J.T., The nature and measurement of the light environment in the ocean, *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*, New York: Plenum Press, 1992, pp. 9–29.

Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P.J., Hooker, S.B., and Franz, B.A., Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach, *Remote Sens. Environ.*, 2007, vol. 111, no. 1, pp. 69–88. doi 10.1016/j.rse.2007.03.012

Murakami, H., Sasaoka, K., Hosoda, K., Fukushima, H., Toratani, M., Frouin, R., Mitchell, B.G., Kahru, M., Deschamps, P.Y., Clark, D., Flora, S., Kishino, M., Saitoh, S., Asanuma, I., Tanaka, A., Sasaki, H., Yokouchi, K., Kiyomoto, Y., Saito, H., Dupouy, C., Siripong, A., Matsumura, S., and Ishizaka, J., Validation of ADEOS-II GLI ocean color products using *in-situ* observations, *J. Oceanogr.*, 2006, vol. 62, no. 3, pp. 373–393.

Painter, S.C., Sanders, R., Poulton, A.J., Woodward, E.M.S., Lucas, M.I., and Chamberlain, K., Nitrate uptake at photic zone depths is not important for export in the subtropical ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 2007, vol. 21, no. 4, art. ID GB4005. doi 10.1029/2006GB002807

Park, K.-A., Ullman, D.S., Kim, K., Chung, J.Y., and Kim, K.-R., Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea, *Deep-Sea Res., Part I*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 453–470. doi 10.1016/j.dsr.2006.12.010

Sverdrup, H.U., On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 1953, vol. 18, pp. 287–295.

Talling, J.F., Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation, *New Phytol.*, 1957, vol. 56, no. 1, pp. 29–50. doi 10.1111/j.1469-8137.1957.tb07447.x

Yamada, K., Ishizaka, J., and Nagata, H., Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002, *J. Oceanogr.*, 2005, vol. 61, no. 5, pp. 857–869.

Yamada, K., Ishizaka, J., Yoo, S., Kim, H., and Chiba, S., Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea (JES), *Prog. Oceanogr.*, 2004, vol. 61, no. 2–4, pp. 193–211. doi 10.1016/j.pocean.2004.06.001

Zhao, T.L., Gong, S.L., Zhang, X.Y., and McKendry, I.G., Modeled size-segregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE-Asia 2001: Implications for trans-Pacific transport, *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D23, art. ID 8665. doi 10.1029/2002JD003363

Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy osnovnykh biogennykh elementov (Methods of Hydrochemical Studies of Main Nutrients), Moscow: VNIRO, 1988.

Sovremennyye metody gidrokhimicheskikh issledovaniy okeana (Modern Methods of Hydrochemical Studies of the Ocean), Moscow: P.P. Shirshov Inst. Okeanol., Ross. Akad. Nauk, 1992.

Zakharkov, S.P., Hydrobiological team report, *Nauchnyi otchet ob ekspeditsii TOI DVO RAN na NIS "Akademik M.A. Lavrent'ev", reis no. 33* (Research Report on the Expedition of V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, Aboard R/V *Akademik M.A. Lavrentyev*, Cruise no. 33), Vladivostok: V.I. Il'ichev Tikhookean. Okeanol. Inst., Ross. Akad. Nauk, 2004, pp. 40–47.

Поступила в редакцию 21.09.2018 г.

После доработки 1.10.2018 г.

Принята к публикации 11.10.2018 г.