

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ СУДОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2019 г. В. И. Звалинский¹, П. В. Лобанова², П. Я. Тищенко¹, В. Б. Лобанов¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева,
Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: biomar@mail.ru

Поступила в редакцию 27.07.2017 г.

После доработки 03.01.2018 г.

В работе проанализированы данные судовых наблюдений на 45 станциях, выполненные в северо-западной части Японского моря (35–44° с.ш., 130–137° в.д.) в 33-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в период с 7 по 18 мая 2004 года. Для анализа использованы *in situ* данные STD-зондирований, ассимиляционного числа, концентрации биогенных веществ (соединений азота, фосфора, кремния) и хлорофилла «а». Для этих же станций из баз данных Climate Change Initiative Ocean Colour (CCI OC) и Ocean Productivity использованы спутниковые данные концентрации хлорофилла «а», коэффициента диффузного ослабления света на длине волны 490 нм, первичной продукции (ПП) и фотосинтетически активной солнечной радиации. Содержание хлорофилла «а» в первом оптическом слое, оценённое из результатов судовых измерений, в среднем составило 0.55 ± 0.58 мг/м³, а оценки по спутниковым данным - почти вдвое выше (0.95 ± 0.36 мг/м³). Величины ПП, оцененные на основе судовых измерений составили 1870 ± 900 , тогда как на основе спутниковых данных эта величина была в 1.5 раза ниже - 1226 ± 432 мг С/м²×день. Вертикальные профили хлорофилла «а» показали, что основная масса хлорофилла «а» сосредоточена в слое от 20 до 45 м. Измерения ассимиляционного числа показали, что основная продукция формируется в слое 0–55 м на юге и 0–30 м на севере. Низкая степень корреляции судовых и спутниковых величин хлорофилла «а» и ПП, является следствием низкой точности спутниковых оценок.

Ключевые слова: первичная продукция, модели, хлорофилл «а», эвфотический слой, Японское море, спутниковые данные, экспедиционные исследования

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030-15745945-55>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования первичной продукции (ПП) в северной части Тихого океана начались Институтом океанологии им. П.П. Ширшова в начале 60-х годов 20-го века на НИС «Витязь» методом радиоуглеродной метки С¹⁴. 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 [11,12]. Из этих данных следует, что ПП северной части Японского моря превышала 500 мг С/м²×день, а южной – 250–500 мг С/м²×день. Позже для акватории Цусимской котловины (юго-западная часть Японского моря), на основе экспедиционных исследований было установлено, что ПП находится в пределах 172–358 г С/м²год [23].

В работе [32] впервые проведено сравнение спутниковых и судовых оценок в Японском море для 13 станций и описана пространственно-временная изменчивость спутниковой ПП, которая восстанавливалась с использованием модифицированного варианта модели VGPM (Vertically Generalized Production Model) и на основании данных цвета океана со сканера SeaWiFS [20,21]. Сравнение измерений судовых *in situ* и спутниковых данных в четырех районах Японского моря показали хорошую корреляцию между двумя подходами оценки ПП. Годовая ПП у берегов России (Татарский пролив), в центральном, юго-восточном и юго-западном районах Японского моря составляла 170, 162, 191 и 222 г С/м²год, соответственно [32].

Анализ спутниковых данных ПП из базы Ocean Productivity с 2003 по 2012 гг. показал, что наибольшие среднегодовые значения ПП наблюдались в 2009 и 2004 гг. (811 и 789 мг С/м²×день), а наименьшие – в 2005 и 2012 гг. (654 и 687 мг С/м²×день) [17].

Оценки с использованием спутниковых данных CZCS (Nimbus-7 Coastal Zone Cooler Scanner) в период 1978-1986 гг. показали, что весеннее «цветение» в центральной части Японского моря начинается в феврале-марте, в южной части – в апреле, на севере оно происходит в мае [25]. С использованием спутниковых данных в работе [1] оценено содержание хлорофилла «а» (хл «а») в столбе воды в заливе Петра Великого, которое составило от 40 (декабрь-январь) до 120 (май-июнь) мг/м².

При использовании дистанционных методов оценки ПП с помощью моделей основной проблемой является вопрос о том, насколько точно они отражают измерения *in situ* [10]. Для различных районов Тихого океана было установлено, что в 9 из 10 случаев степень корреляции между судовыми параметрами хл «а», ПП и аналогичными данными спутниковых наблюдений низка [18]. Одной из причин этого является использование в моделях ПП либо восстановленных из других гидрологических параметров, либо ранее измеренных региональных или сезонных значений удельной максимальной скорости фотосинтеза (ассимиляционного числа), P^b , что авторы считают не совсем корректным.

Очевидно, что качество спутниковых данных цвета океана можно оценить только сравнением с одновременными измерениями *in situ*. Анализ показал, что между спутниковыми данными ПП и соответствующими измерениями *in situ* в целом наблюдается корреляция, которая составляет около 47 % [27]. Исследователи сходятся во мнении о том, что спутниковые наблюдения хл «а» и ПП в океане должны подкрепляться измерениями *in situ*. Помимо влияния объективных факторов, на спутниковые данные ПП в океане существенное влияние оказывает субъективный фактор – выбор и использование математической модели для оценки ПП в море [22].

Ранее нами были проведены измерения содержания хл «а» и биогенных веществ (БВ), а также величины ПП (радиоуглеродным методом) в столбе воды в северо-западной части Японского моря по результатам экспедиции на НИС «Профессор Гагаринский» в осенний пе-

риод (12.10-03.11) 2000 г. [8]. Содержание хл «а» в слое фотосинтеза составляло от 11 до 30 мг/м², интегральная ПП оценена от 120 до 520 мг С/м²×день. Подробных данных о продукционных характеристиках северо-западной части Японского моря в этот период в литературе нами не найдено.

В настоящей работе на региональном масштабе проведено сравнение судовых и спутниковых оценок содержания хл «а» и величин ПП в северо-западной части Японского моря (35-44° с.ш., 130-137° в.д.) в весенний период 2004 г.

МЕТОДЫ

В работе использованы данные 33-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (в дальнейшем – La33), в котором в период с 7 по 18 мая 2004 г. выполнено 49 станций, расположенных вдоль трех разрезов (рис. 1). Экспедиция выполнялась Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичёва (ТОИ ДВО РАН) совместно с Сеульским университетом (Республика Корея) в рамках международной программы CREAMS (Circulation Research of East Asian Marginal Seas). Гидрологические работы в экспедиции выполнялись с помощью STD-зонда SBE-911 с датчиками температуры, электропроводности, давления и содержания растворенного кислорода и батометрической системы для отбора проб воды. Для дальнейшего анализа использованы следующие судовые данные измерений *in situ*: результаты STD-зондирований, концентрации БВ (N - сумма нитритов и нитратов, P - сумма анионов ортофосфорной кислоты, Si - сумма всех форм мета- и орто-кремниевой кислоты) и хл «а», измеренные по методикам [13,14]. Для станций, выполненных в дневное время суток, дополнительно измерялась глубина видимости по диску Секки. В работе использованы спутниковые данные из баз CCI OC, версия 2 и Ocean Productivity [28,29].

Оценка первичной продукции

Хлорофилл. Пробы воды отбирались системой «Розетт» на всех горизонтах от 0 до 100 метров. Измерение хл «а» проводилось экстракционным спектрофотометрическим методом [13,14]. Интегральное содержание хл «а» в столбе воды рассчитывалось суммированием по глубине в пределах фотического слоя с шагом 0.5 метра:

$$Chl_{su} = 0.5 \times \sum Chl(z), \quad (1)$$

где $Chl(z)_i$ и Chl_{eu} — содержание хл «а» в слое (mg/m^3) и интегральное содержание хл «а» в столбе воды (mg/m^2).

Глубина эвфотической зоны (продукционного слоя), Z_{eu} , нами оценивалась на основе данных о вертикальных профилях хл «а» и БВ. Для каждой станции, выполненных в дневное время (всего 21 станций), величина Z_{eu} , дополнительно оценивалась по глубине видимости диска Секки. Известно, что нижняя граница глубоководного максимума хл «а» соответствует нижней границе эвфотического слоя. Одновременно на этой границе наблюдается резкое повышение содержания нитратов (формирование «нитро-клина») и других БВ [24,30]. Резкое понижение содержания хл «а» на нижнем горизонте глубоководного максимума, сопровождавшееся резким повышением содержания БВ (P, N и Si), мы интерпретировали как проявление нижней границы эвфотической зоны. Z_{eu} , соответствующую 1% проникновению фотосинтетически активной радиации — ФАР (I_{eu}), и коэффициент диффузного ослабления света для всего спектра ФАР, k_d , находили из соотношений:

$$Z_{eu} = \frac{\ln(I_0 / I_{eu})}{k_d} = \frac{\ln(I_0 / 0.01 \times I_0)}{k_d}; \quad k_d = 4.6 / Z_{eu}. \quad (2)$$

Долготу дня и количество ФАР рассчитывали с помощью основной астрономической формулы [2] с учетом солнечной постоянной $I_0 \approx 6$ моль квантов/ m^2 час для безоблачного неба, см. также [5-6, 8]. Для сравнения использовали спутниковые оценки средней за день поверхностной ФАР. Две оценки дали сравнимые результаты при долготе дня равном 12 час.

Первичная продукция и ассимиляционное число измерялись в пробах воды, взятых с 4 горизонтов — 3-(20)-30-50 м (т.е. когда не отбиралась проба с горизонта 20 м, ее заменяли на пробу с 50 м), итого было измерено: 3 м — 9; 20 м — 6; 30 м — 6; 50 м — 5 станций. На станциях, где не доставало какого-либо из перечисленных 4 горизонтов, их данные вычислялись путем линейной интерполяции измерений соседних горизонтов. На горизонте 75 м данные вычислялись методом экстраполяции. В результате были получены данные для 9 станций по 5 горизонтов каждая. P^b измерялось с помощью радиоуглеродной метки ^{14}C по методике, предложенной [4, 15]. В среднем величина P^b составила 4.46 ($mg C / mg Xl \times ч$). Его величина соизмерима с данными других исследователей [16]. ПП и P^b на остальных станциях оценивались также путем линейной интерполяции

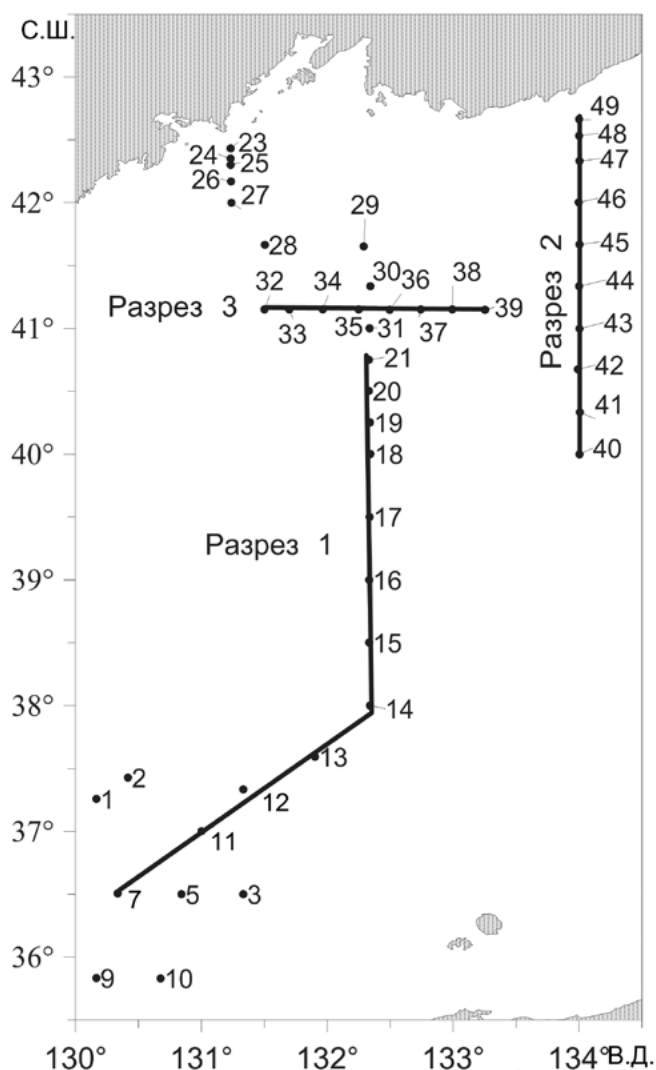


Рис. 1. Расположение станций в экспедиции ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (La33) в период 7-18.05.2004 г.

между соседними станциями соответствующих горизонтов, что позволило получить данные для всего полигона. Интегральная ПП в столбе воды в течение светового дня оценивалась из соотношения:

$$P = T_d \times \sum_{Z_{eu}} P^b \times Chl(z) \times (Z_{up} - Z_{bot}), \quad (3)$$

где P^b — ассимиляционное число $mg C / (mg Xl \times час)$; Z_{up} и Z_{bot} — верхняя и нижняя граница слоя; $Chl(z)$ — концентрация Хл в слое (mg/m^3); T_d — долгота дня (час).

Спутниковые данные. Данные концентрации хл «а» (mg/m^3) и коэффициента диффузного ослабления света для длины волны 490 нм (m^{-1}), $k_d 490$, взяты из базы данных ССИ ОС, версия 2 [29]. Используемые массивы представляют собой объединённую информацию с трёх спектрорадиометров (SeaWiFS, MODIS

Aqua и MERIS) с пространственным разрешением 4×4 км и временной дискретностью – 1 день. Данные ПП и поверхностной ФАР (спектрорадиометр MODIS Aqua) взяты из базы данных Ocean Productivity [28]. Данные дневной интегральной ПП в столбе воды эвфотического слоя рассчитаны с помощью модели VGPM [20] на основе спутниковой информации о цвете океана, температуре поверхности воды и ФАР. Данные первичной

продукции и ФАР имеют пространственную дискретность 0.0834×0.0834 град (по широте и долготе), временную 8 суток, и представляют собой среднее значение характеристики за 8 дней. Дата, к которой привязаны данные, соответствует началу 8-дневного промежутка осреднения. Все спутниковые данные были проинтерполированы нами по пространству двухмерной интерполяцией в точки с координатами станций.

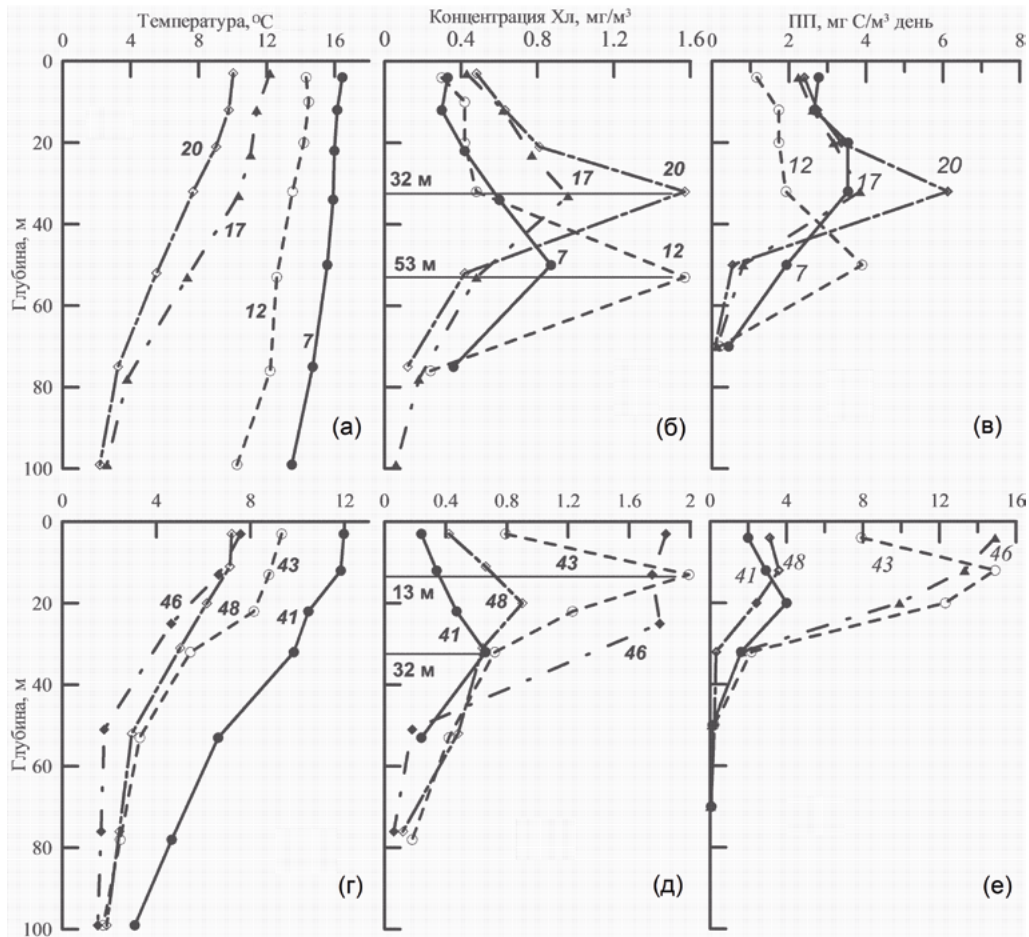


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (а, г), концентрации хл «а» (б, д) и первичной продукции (в, е) на станциях меридиональных разрезов 7-21 (станции 7, 12, 17, 20) и 40-49 (станции 41, 43, 46, 48) полигона La33 (рис. 1а) (цифры на кривых – номера станций). Горизонтальные линии на рис. 2б и 2д указывают глубину максимумов хл «а».

Сравнение судовых и спутниковых данных. Нами было проведено сравнение судовых и спутниковых данных концентрации хл «а», ПП и k_d . Известно, что спутниковые данные отражают среднюю концентрацию хл «а» в слое первой оптической глубины ($Z_{opt} = 1/k_d$) [18], поэтому судовые данные хл «а» для сравнения осреднялись в этом слое. Для получения оценок k_d из спутниковых данных $k_d 490$ использовался эмпирический алгоритм, приведенный в [26]. Сравнение проведено для 12 стаций для

концентрации хл «а» и k_d и для 40 станций для величины ПП. Сравнение судовых данных ПП *Ship* и спутниковых ПП *Sat* осуществлялось с помощью корреляционного анализа и построения диаграмм рассеяния.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вертикальные профили и глубина эвфотического слоя. Анализ профилей температуры воды показал их существенное различие между северной и южной частью моря. На самых

южных станциях температура выше и практически не изменяется по вертикали в пределах 100-метрового слоя (станции. 7, 12, рис. 2а). На станциях севернее 40° с.ш., (рис. 1), температура на поверхностных горизонтах ниже, в сравнении с южной частью моря, и в пределах 20-50 м наблюдается ее существенное уменьшение (станции. 17, 20, рис. 2а и станции. 43, 46, 48, рис. 2г).

Все вертикальные профили хл «а» имели максимум на глубинах от 20 до 50 м, а глубоководное снижение содержания хл «а» наблюдалось на глубинах 55-70 м (рис. 2б, 2д). По мере продвижения с юга на север глубина максимумов Хл уменьшалась от 50 м на юге (37° с.ш.; ст. 7, 12) до менее, чем 15 м, на севере (42° с.ш.; ст. 43, 48). Такая особенность в положении максимумов хл «а», отчасти обусловлена особенностями в вертикальном распределении температуры. Более существенные вертикальные изменения температуры в верхнем слое северной части моря снижают интенсивность вертикальной циркуляции, что ограничивает поступление клеток фитопланктона

в более глубокие слои моря. Профили ПП (мг С/м³×день) на станциях южнее 40° имели максимум глубже 20-25 м (рис. 2в), на северных станциях максимумы располагались у самой поверхности (менее 20 м; рис. 2е).

Для профилей БВ характерной особенностью является весьма низкое их содержание в приповерхностном слое (15-20 м) с последующим резким повышением концентраций (рис. 3). Так, если в приповерхностном слое концентрация соединений N, P и Si составляет 0.2-0.5, 0.1-0.2 и 0.4-5.0 мкмоль, соответственно, то глубине снижения содержания хл «а» концентрация этих БВ достигает соответственно 4-8, 0.7 и 10-15 мкмоль. Глубина верхней границы низких концентраций БВ уменьшается по мере продвижения с юга на север: от 40 м на юге (ст. 7, 12) до 20 м и менее на севере. Следует отметить, что повышение содержания азота с глубиной практически совпадает с вертикалями профилями фосфатов и силикатов (рис. 3). Этот факт указывает на то, что в верхнем продукционном слое лимитирующим фактором может оказаться концентрация любого из перечисленных БВ.

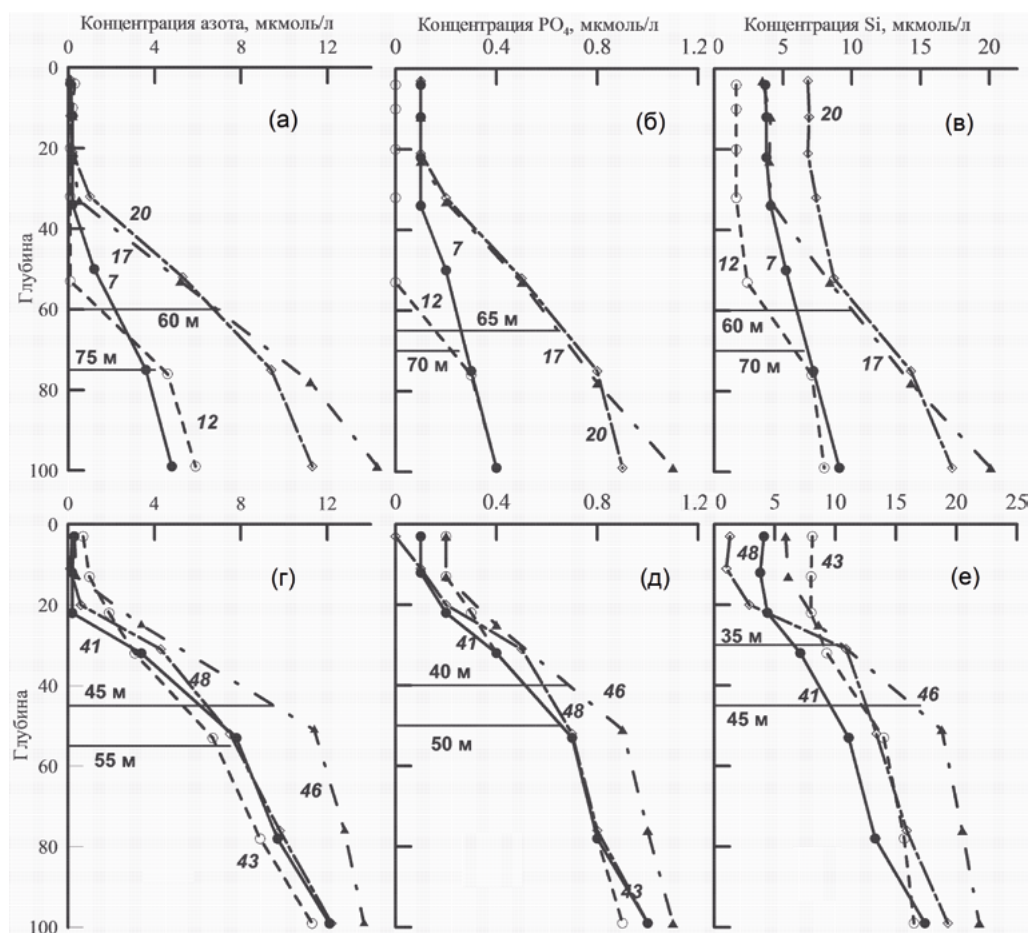


Рис. 3. Вертикальные профили соединений азота, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$, (а, в), фосфатов (б, д) и силикатов (в, е) на станциях разрезов «1» 7-21 (станции 7, 12, 17, 20) и «2» 40-49 (станции 41, 43, 46, 48) полигона La33 (рис. 1а) (цифры на кривых – номера станций). Горизонтальные линии указывают нижнюю границу эвфотической зоны Z_{eu} .

Судовые оценки глубины эвфотического слоя Z_{eu} *Ship*, в среднем составили 46.8 ± 8.1 м, что примерно в полтора раза выше, чем значения, полученные на основе спутниковых данных, Z_{eu} *Sat* (30 ± 10 м), при k_d *Sat* равном 0.151 ± 0.055 м⁻¹) (табл. 1). В то время, как судовые оценки k_d *Ship* составили 0.100 ± 0.02 м⁻¹, что в полтора раза ниже. По величине k_d исследуемая акватория относится к типу II и III океанических вод в соответствии с классификацией Ерлова [3].

Вертикальное и горизонтальное распределение хлорофилла. Выше отмечалось, что спектро-радиометр, установленный на спутнике, регистрирует содержание хл «а» только в первом оптическом слое Chl_{opt} (на глубине $Z_{opt} = 1/k_d$), поэтому этот параметр сравнивали с аналогичными судовыми данными. По судовым данным величина Chl_{opt} в среднем составляла 0.63 ± 0.38

мг/м³, тогда как по спутниковым данным содержание хл «а» в первом оптическом слое было в полтора раза больше – 0.95 ± 0.36 мг/м³ (табл. 2). Основной причиной таких различий, 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 [33]. Присутствие аэрозолей в атмосфере снижает качество спутниковых данных цвета океана. Во всем фотическом слое, Z_{eu} , по судовым данным содержание Chl_{eu} , напротив, было больше (в 1.24 раза), чем по спутниковым данным (табл. 2). Это можно объяснить тем, что большая часть хл «а» находилась на глубине более Z_{opt} , которая измерениям спутника недоступна. Более подробно этот феномен обсуждён в [10].

Таблица 1. Глубина эвфотической зоны, Z_{eu} (м), и коэффициент диффузного ослабления света k_d (м⁻¹), полученные на основе судовых данных, *Ship* (n=40), и спутниковых, *Sat* (n=12). Спутниковые оценки Z_{eu} и k_d для всего спектра ФАР (*PAR*) получены с помощью номограмм [26] из данных k_d 490

	Z_{eu}			k_d		
	<i>Ship PAR</i>	<i>Sat490</i>	<i>Sat PAR</i>	<i>Ship PAR</i>	<i>Sat490</i>	<i>Sat PAR</i>
Средн.	46.8 ± 8.1	42 ± 15	30 ± 10	0.100 ± 0.02	0.110 ± 0.04	0.151 ± 0.055
Мин.	29	20		0.075	0.064	
Макс.	62	61		0.160	0.204	

По судовым данным относительно высокие концентрации хл «а» (более 0.5 мг/м³) в первом оптическом слое, Z_{opt} , наблюдаются менее, чем на половине исследуемого района в северной его части: участки, где концентрации более 1 мг/м³ занимают небольшие акватории в северо-восточной и северо-западной частях района, воды центральной части содержат менее 0.5 и даже менее 0.3 мг/м³ (рис. 4а).

Спутниковые данные в оптическом слое показывают высокое содержание хл «а» практически по всей акватории (более 0.5 мг/м³). Только на севере исследуемого района на судовых и спутниковых съемках наблюдаются схожие распределения (рис. 4а, 4б). В продукционном слое по данным судовых измерений на большей части акватории содержание Хл варьирует в пределах 16 – 56 (в среднем 36.9 ± 9.7) мг/м² (табл. 2). При этом, максимальное содержание (более 32 мг/м²) находится на севере района (рис. 4в).

О закономерностях вертикального распределения ПП можно судить по распределению концентрации хл «а» на разных горизонтах (рис. 5), где видно, что на глубинах 0 – 20 м наиболее высокие концентрации хл «а» наблюда-

ются на северных, в частности, прибрежных станциях района (рис. 5а – 5в). Концентрация хл «а» с глубиной увеличивается и достигает максимума на горизонте 30 м (более 0.7 мг/м³), эти значения наблюдались практически на всей акватории (рис. 5г). На горизонте 50 м концентрация хл «а» понижалась до 0.3 – 0.5 мг/м³, более высокие содержания наблюдались лишь на южных станциях, станции 5 , 7 , 11 – 12 , и в районе станции 30 – 31 , 35 – 36 (рис. 1а). На глубине 75 м концентрации были менее 0.1 мг/м³, что указывает на то, что данная глубина находилась на границе эвфотического слоя.

Таблица 2. Среднее содержание хлорофилла «а» в первом оптическом слое Chl_{opt} (мг/м³) и интегральное содержание в эвфотическом слое Chl_{eu} (мг/м²) по судовым, *Ship*, и спутниковым, *Sat*, данным

	Z_{eu}		k_d	
	<i>Ship</i>	<i>Sat</i>	<i>Ship</i>	<i>Sat</i>
Средн.	0.63 ± 0.38	0.95 ± 0.36	36.9 ± 9.7	29.8 ± 8.2
Мин.	0.21	0.42	16.3	19.6
Макс.	1.67	1.51	56.2	54.5

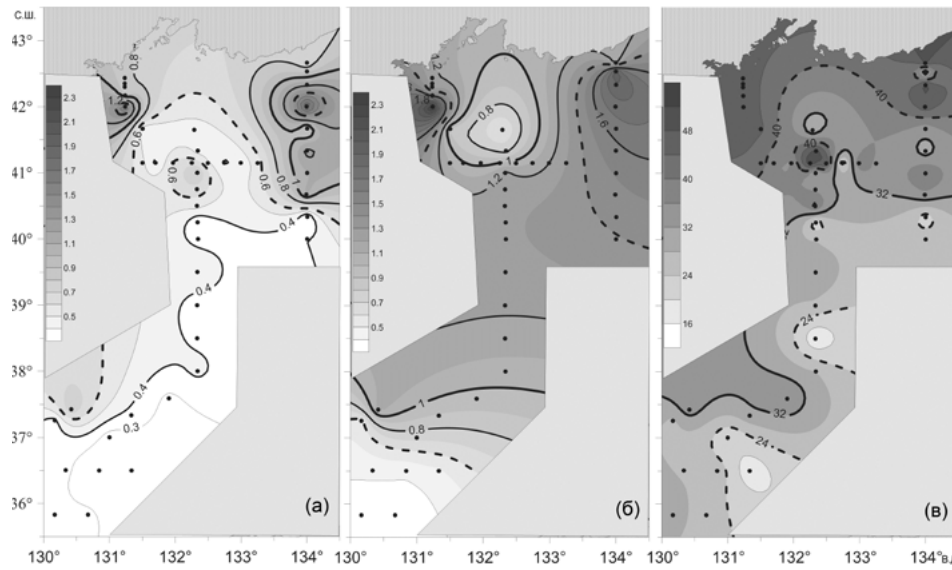


Рис. 4. Пространственное распределение среднего содержания хл «а» в первом оптическом слое, Chl_{opt} , по судовым (а) и спутниковым (б) данным (mg/m^3) и интегрального содержания хл «а» во всем эвфотическом слое, Chl_{eu} , по судовым данным (mg/m^2).

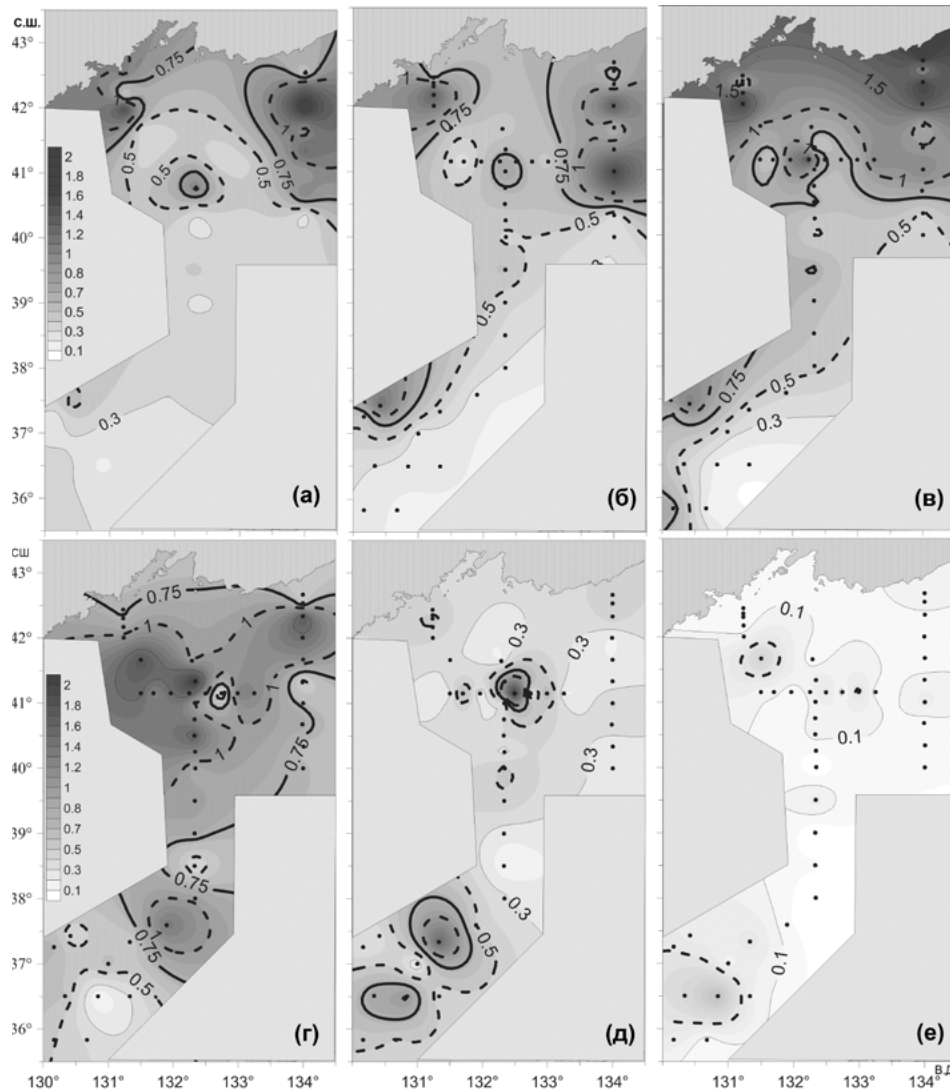


Рис. 5. Распределение хл «а» (mg/m^3) на горизонтах 0, 10, 20, 30, 50 и 75 м, (а), (б), (в), (г), (д) и (е), соответственно, во время экспедиции La33 (07-18) 05.2004 г.

Первичная продукция. Оценки ПП показывают, что в среднем судовые данные ПП дают более высокие результаты, чем спутниковые данные ПП — 1870 ± 770 и 1226 ± 432 мг С/м²×день, соответственно: т.е. они различаются в полтора раза (отношение ПП *Ship* к ПП *Sat* составило 1.52) (табл. 3).

Таблица 3. Величина интегральной первичной продукции, ПП (мг С/м²×день), оцененная по судовым, *Ship*, и спутниковым данным, *Sat*

	ПП (мг С/м ² ×день)	
	<i>Ship</i>	<i>Sat</i>
Средн.	1870±900	1226±432
Мин.	760	718
Макс.	3790	2251

Пространственное распределение ПП, рассчитанной по судовым и спутниковым данным, в целом показывает схожую картину: высокий ее уровень наблюдается на севере и на самом юге района. Однако, судовая ПП на большей части полигона имеет величину более 1400 мг С/м²×день (рис. 6а), тогда как спутниковые данные показывает более низкие значения ПП — менее 900 мг С/м²×день (рис. 6б). Таким образом, в соответствии с оценками в мае 2004 г. наиболее продуктивной была северная и западная части исследуемого района, наименее продуктивными являлись центральная и юго-восточная части (рис. 6). При этом, судовые данные ПП были 1,5 раза больше, чем спутниковые (табл. 3).

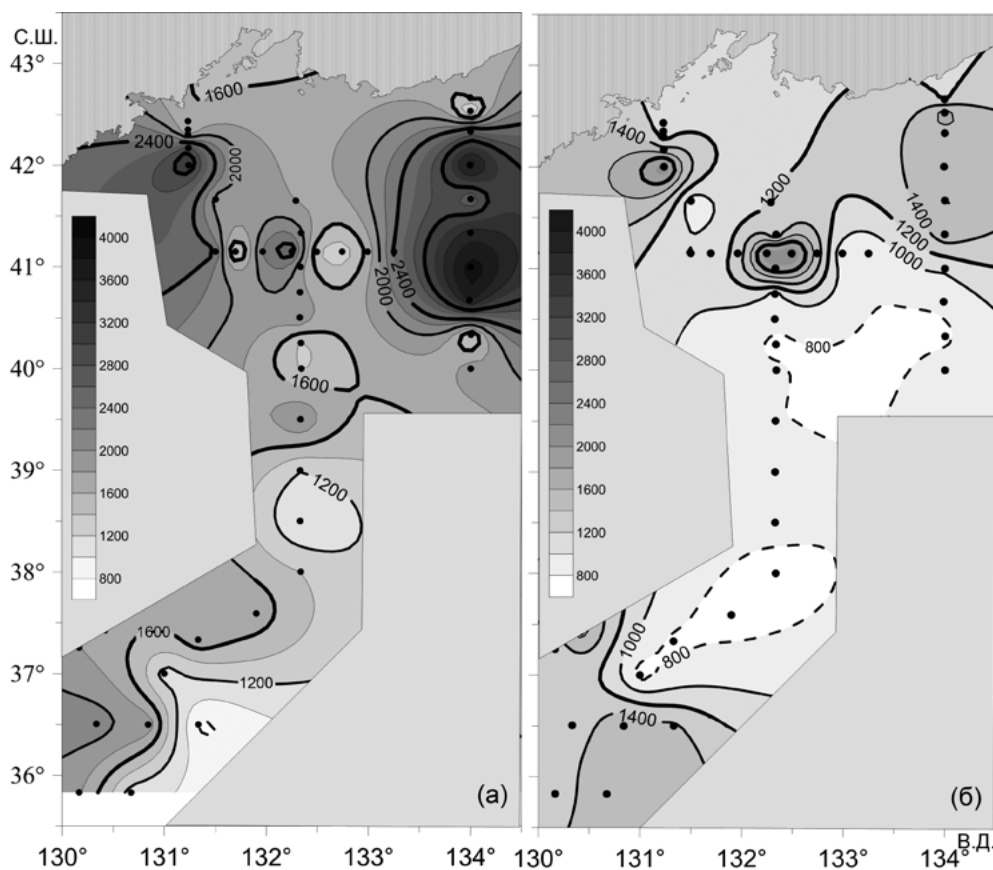


Рис. 6. Распределение первичной продукции (мг С/м²×день), оцененной на основании судовых (а) и спутниковых (б) данных во время экспедиции La33 (07-18) 05.2004 г.

Сравнение судовых и спутниковых данных. Сравнение концентрации хл «а» по судовым и спутниковым данным (*Chl Ship* и *Chl Sat*) проведено для 12 станций. В первом оптическом слое судовые и спутниковые оценки хл «а» имели достаточно высокую степень корреляции ($Chl Sat = 1.3 \cdot Chl Ship + 0.27$, $r^2 = 0.71$; рис. 7а). Включение в корреляционное поле всех имеющихся спутниковых данных и данных,

полученных интерполированием, приводит к тому, что корреляции между *Chl Ship* и *Chl Sat* практически не наблюдается; $r^2 < 0.01$, на рисунке не показано. Последнее можно объяснить особенностью распределения хл «а», с одной стороны, и данными наблюдения спутника, с другой: основная масса хл «а» сосредоточена на глубине 20-50 м, тогда как спутник «видит» до глубины менее 15 м (табл. 1).

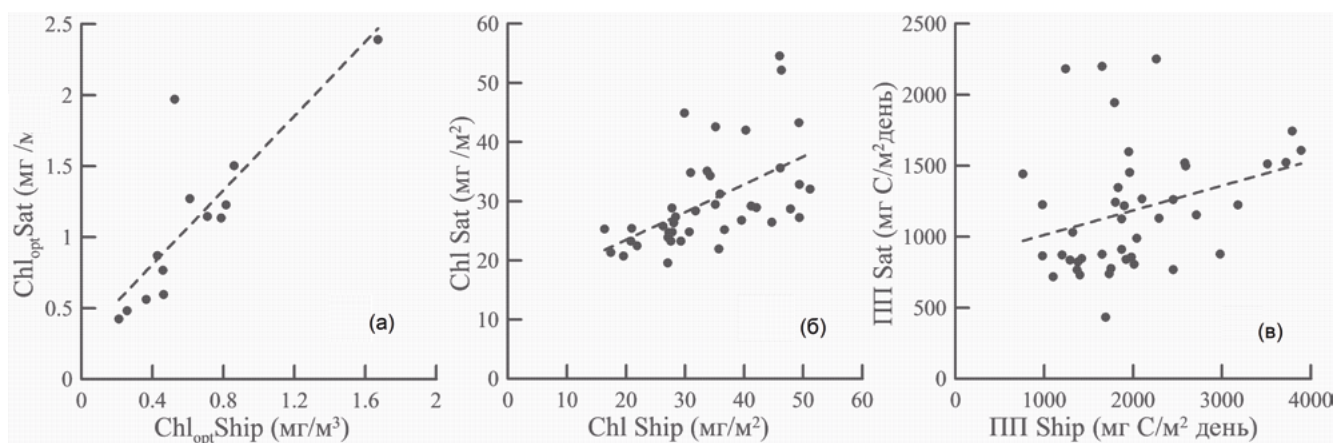


Рис. 7. Корреляционные поля судовых и спутниковых данных хл «а» и ПП для станций экспедиции La33:

(а) – содержание хл «а» в первом оптическом слое Chl_{opt} ($n=13$);
 (б) – содержание хл «а» в эвфотическом слое Chl_{eu} (Z_{eu}) ($n=43$); (в) – величины ПП ($n=43$).

Низкая корреляция наблюдается между распределением хл «а» во всем эвфотическом слое: $Chl_{eu} Sat = 0.47 \times Chl_{eu} Ship + 14$, $r^2 = 0.3$ (рис. 7б). Еще меньше наблюдается корреляция между ПП Ship и ПП Sat: $ПП Sat = 0.13 \times ПП Ship + 950$, $r^2 \approx 0.17$ (рис. 7в). Одной из причин низкой корреляции двух оценок ПП является отмеченная выше низкая корреляция судовых и спутниковых данных содержания хл «а» (рис. 4). Сравнение судовых и спутниковых оценок ПП в различных районах Тихого океана также показало их низкую корреляцию [19] что, по мнению авторов, является следствием низкой точности спутниковых оценок.

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки содержания хл «а» в первом оптическом слое показали, что по судовым измерениям оно было в среднем 0.55 ± 0.58 мг/м³, а по спутниковым данным почти вдвое выше – 0.95 ± 0.36 мг/м³. Как известно [25, 31, 32] в мае в северной части Японского моря происходит весеннее цветение фитопланктона и наблюдается максимальное содержание хл «а» (более 1 мг/м³). Полученные нами спутниковые данные близки к оценкам [25], однако судовые значения значительно ниже. В работе [1] с использованием спутниковых данных оценено содержание хл «а» в столбе воды в Заливе Петра Великого от 40 (декабрь-январь) до 120 (май-июнь) мг/м². По нашим данным в Заливе Петра Великого в мае содержание хл «а» составляло от 25 до 62 мг/м² (станции 27-28, рис. 1). Этот район нами подробно исследовался и ранее, в результате чего было показано, что наиболее высокие содержания хл «а» в продукционном слое (до 120 мг/м²) наблюдаются в северной части залива в пе-

риод высоких летних паводков р. Раздольной и других рек, впадающих в залив [7]. При низких уровнях рек содержание хл «а» в эвфотическом слое не превышает 20 мг/м² [9]. Таким образом, судовые оценки хл «а» для мая 2004 г., хорошо согласуются с полученными ранее оценками по наблюдениям *in situ*, но остаются заметно ниже величин, полученных по спутниковым данным другими авторами [1].

Наши оценки для северо-западной части Японского моря показали, что в мае 2004 года величина ПП составила от 770 до 4000 мг С/м²×день, что значительно выше значений 500 мг С/м²×день, полученных в работах [11,12]. По мнению авторов [32], которые провели в 1998-2002 гг. оценку пространственной и временной изменчивости ПП Японского моря на основании спутниковых данных по модели VGPM, максимальная ПП (до 800 мг С/м²×день) у российских берегов наблюдалась в мае и оставалась на уровне более 400 мг С/м²×день до октября. Авторы нашли, что самая низкая годовая ПП наблюдается восточнее 132° в.д. и составляет около 150 г С/м²×год. В экспедиции La33 на северных станциях восточнее 132° в.д. было высоким как содержание хл «а» более 1 мг/м³ (рис. 7), так и величина ПП, до 4000 мг С/м²×день (рис. 6). Однако, на юге полигона восточнее 132° в.д., действительно, пониженными были как содержание хл «а» (менее 0.5 мг/м³), так и величина ПП (менее 900 мг С/м²×день).

В данной работе получена весьма низкая степень корреляции судовых и спутниковых величин ПП (рис. 7в). Существует несколько причин наблюдаемых расхождений [10]. Известно, что твёрдая пыль, как продукт эрозии горных пород, является основным компонентом аэрозолей в атмосфере, влияя на ее состав и прозрачность. Это, в свою очередь,

сказывается на спутниковых оценках концентрации хл «а», поскольку одним из важных источников ошибок дистанционного зондирования цвета океана является атмосфера, приводя к завышенным значениям хл «а» в пределах Z_{opt} (рис. 4). Очевидно, что алгоритм обработки спутниковых наблюдений содержит обратную связь между концентрацией хл «а» и глубиной эвфотического слоя, т.е. чем выше концентрация хл «а», тем меньше глубина эвфотического слоя. Из полученных нами результатов следует, что в алгоритме ее оценки эта связь более сильная, чем это соответствует реальности. По этой причине спутниковые оценки глубины эвфотического слоя меньше, что приводит к заниженному содержанию хл «а» в столбе воды и, соответственно, к заниженному значению ПП. Другая причина состоит в особенностях вертикального распределения Хл. В нашем случае, для большей части полигона основная масса хл «а» залегала на глубине, превышающей первую оптическую глубину, которая недоступна для спутникового спектрорадиометра. Таким образом, особенность данной акватории в мае 2004 г. такова, что характеристики зондирующей спутниковой аппаратуры и алгоритм модели VGPM приводят к низкой корреляции спутниковых и судовых наблюдений содержания Хл и ПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные нами результаты по содержанию хл «а», величине ПП и их распределению в западной части Японского моря в весенний период являются в значительной степени новыми. Вертикальные профили и разрезы хл «а», БВ и температуры для этого района и этого времени, а также пространственное распределение хл «а» и ПП ранее не представлялось. Приведенные данные по содержанию хл «а» и величине ПП в целом соответствуют известным в литературе данным, однако наши данные детализируют распределение этих параметров. Приведенные данные показывают, что основная масса хл «а» сосредоточена в слое от 20 до 40 м. На северных станциях полигона было высоким как содержание хл «а», более 1 мг/м^3 (рис. 7), так и величина ПП, до $4000 \text{ мг С/м}^2 \times \text{день}$ (рис. 6). Однако, на юге полигона восточнее 132° в.д. , были пониженными как содержание хл «а» (менее 0.5 мг/м^3), так и величина ПП (менее $800 \text{ мг С/м}^2 \times \text{день}$). Именно в этот слой происходит подток БВ и их изъятие при продуцировании органического вещества.

Источник финансирования. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-35-50443-мол_нр и программы «Дальний Восток» (гранты № 15-1-1-047, №15-1-1-010 и №18-1-010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Бартенева О.Д., Полякова Е.А., Русин Н.П. Режим естественной освещенности на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 239 С.
3. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
4. 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.
5. Звалинский В.И. Формирование первичной продукции в море // Изв. ТИНРО. 2006. Т. 147. С. 276–302.
6. Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // Океанология, 2006. Т. 46. № 1. С. 27–37.
7. Звалинский В.И., Тищенко П.П., Тищенко П.Я., и др. Результаты съемки гидрохимических и продукционных параметров на акватории Амурского залива в период паводка в августе 2005 года // Современное состояние и тенденции изменения природной среды Залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 199–229.
8. Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 1–15.
9. Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я., и др. Продукционные характеристики эстуария реки Раздольной в период ледостава // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 155–174.
10. Лобанова П.В., Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Концентрация хлорофилла-а и первичная продукция фитопланктона в западной части Японского моря по натурным и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 135–147
11. Кобленц-Мишке О.И. Величина первичной продукции Тихого океана // Океанология. 1965. Т. 5 (2). С. 325–337.
12. Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И. Первичная продукция // Биология океана. М.: Наука, 1977. Т. 2. С. 183–189.
13. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М.: ВНИРО, 1988. 120 С.
14. Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИО РАН им. П.П. Ширшова, 1992. 199 с.
15. Сорокин Ю.И. Определение продуктивности фотосинтеза фитопланктона в водной толще с помощью C^{14} // Физиол. растений. 1959. Т. 6. С. 118–125.
16. Тищенко П.П., Звалинский В.И., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. Первичная продукция Амурского залива (Японское море) в летний сезон 2008 года // Биология моря, 2017. Т. 43. № 3. С. 195 – 202.

17. Шамбарова Ю.В., Степочкин И.Е., Захарков С.П. Исследование изменчивости первичной продукции в Японском море по спутниковым данным на основе ЭОФ-анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 80-92.
18. Antoine D. Global- and ocean-scale primary production from satellite observations. Chapter 4 // Remote sensing of the marine environment (edited by Gower J.F.R.). 2006. USA: ASPRS. P. 85 – 147.
19. Banse K., Postel J.R. On using pigment-normalized? Light-saturated carbon uptake with satellite-derived pigment for estimating column photosynthesis. Global Biogeochem. Cycles. V. 17. № 3. 1079. doi 10.1029/2002GB002021. 2003.
20. Behrenfeld M. J., and Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration//Limnology and Oceanography. 1997a. V. 42(1). P. 1–20.
21. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // Limnology and Oceanography. 1997b. V. 42(7). P. 1479-1491.
22. Carr M-E., Friedrichs M.A.M, Schmeltz M. et all. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean Colour // Deep-Sea Res. II. 2006. V. 53. P. 741–770.
23. Choi J.K., Noh J.H., Orlova T. et al. Phytoplankton and Primary Production: In: Oceanography of the East Sea (Japan Sea). Kyung-Il Chang, Chang-Ik Zhang, Chul Park, Dong-Jin Kang, Se-Jong Ju, Sang-Hoon Lee, Mark Wimbush, Editors/ Springer International Publishing AG Switzerland. 2016.
24. 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. V. 463. P. 30-57.
25. Kim S.W., Saitoh, S., Ishizaka J. et al. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images // J. of Ocean. 2000. V. 56 (5). P. 527–538.
26. 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), doi: 10.1016/j.rse.2007.03.012.
27. Murakami H., Sasaoka K., Hosoda K. et al. Validation of ADEOS-II GLI Ocean Colour Products Using In-Situ Observations // J. of Oceanography. 2006. V. 62. P. 373-393.
28. NASA's Ocean Colour Web. URL: <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>
29. Ocean Colour CCI home page. URL: <http://www.esa-oceancolour-cci.org>
30. Painter S.C., Sanders R., Poulton A.J. et al. Nitrate uptake at photic zone depths is not important for export in subtropical ocean. Global Biogeochem Cycles. 2007. 21:GB4005 doi:1029/2006GB002807.
31. 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. V. 61. P. 193–211.
32. 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. V. 61. P. 857–869.
33. 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 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. V. 108. N. D23.

Estimation of Primary Production in the Northwestern Part of the Sea of Japan by Ship- and Satellite-Based Observations

© 2019 V. I. Zvalinsky¹, P. V. Lobanova², P. Ya. Tishchenko¹, V. B. Lobanov¹

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

e-mail: biomar@mail.ru

Received July 27, 2017

After revision January 3, 2017

In this paper, we analyzed data of POI FAB RAS cruise (No. 33) held on «Akademik M.A. Lavrentyev» vessel in the northwestern part of the Japan Sea in May 2004 and compared them with satellite derived data from Climate Change Initiative Ocean Colour (CCI-OC) and Ocean productivity databases. The following in situ data were used for the analysis: CTD-data, assimilation number, nutrients (P, N, Si) and chlorophyll a (Chl). Ship assessments of Chl in the first optical layer were in average 0.5 ± 0.58 mg/m³, while satellite Chl were nearly twice more – 0.95 ± 0.36 mg/m³. Ship assessments of primary production (PP) were 1870 ± 900 mg C/m²day that is 1.5 times larger than satellite derived data - 1226 ± 432 . Vertical profiles of nutrients, temperature and Chl showed that main mass of Chl was concentrated in a layer from 20 to 45 m, where the main production is formed. According to values of assimilation number, main production formed in a layer of 0-55 m in the south of the region and 0-30 m in the north. Weak correlation between ship and satellite PP values found in this paper may be explained by low accuracy of satellite derived estimation.

Keywords: primary production, models, chlorophyll-a, euphotic zone, Sea of Japan, remote sensing, ship measurements