

Первичная продукция фитопланктона и концентрация хлорофилла-а в западной части Японского моря по спутниковым и натурным данным

П.В. Лобанова¹, В.И. Звалинский², П.Я. Тищенко²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: pl19@mail.ru

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: tpravel@poi.dvo.ru

Дистанционное зондирование океана позволяет анализировать пространственно-временную изменчивость концентрации хлорофилла-а (Chl) в подповерхностном слое и оценивать первичную продукцию фитопланктона (PP) на региональных и глобальных масштабах. Однако усовершенствование дистанционных алгоритмов требует систематической валидации спутниковых оценок с помощью натурных измерений. В данной работе проведено сравнение модельных спутниковых и натурных оценок PP и спутниковых и натурных оценок Chl в западной части Японского моря (35°–44° с.ш., 130°–137° в.д.) в весенний период 2004 г. и осенние периоды 2005 и 2011 годов. В качестве спутниковой PP использованы её оценки по модели VGPM из базы данных Ocean Productivity. Натурная PP восстанавливалась на основе *in situ* данных Chl, ассимиляционного числа, биогенных элементов и температуры поверхности океана по двум моделям: по VGPM и модели, разработанной в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичёва (ТОИ ДВО РАН). Результаты сравнения обнаруживают среднюю связь между модельными спутниковыми и натурными оценками PP и спутниковыми и натурными оценками Chl: $r = 0,56$ – $0,63$ для PP и $r = 0,58$ для Chl. Средние для всех пунктов наблюдений оценки показывают, что различие между спутниковыми и натурными данными двух рассматриваемых параметров невелико. Хотя в отдельных случаях оно может достигать 1,5–1,7 раз. Спутниковый Chl в среднем выше *in situ*, в то время как модельные спутниковые оценки PP ниже натурных, восстановленных по модели ТОИ ДВО РАН, но выше натурных PP по VGPM. Различие спутниковых и натурных модельных оценок PP мы связываем с особенностью вертикального распределения Chl в эвфотическом слое и величиной ассимиляционного числа, используемого в моделях.

Ключевые слова: хлорофилл-а, первичная продукция, модели первичной продукции, Японское море, спутниковые данные цвета океана.

Одобрена к печати: 13.04.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-135-147

Введение

Первичная продукция в океане (PP) – создание органического вещества из неорганических соединений – осуществляется в основном фитопланктоном при фотосинтезе при участии зелёного пигмента хлорофилла-а (Chl). Обуславливает функционирование и продукцию последующих трофических звеньев морской экосистемы и играет важную роль в глобальных циклах углерода и кислорода. Одним из способов оценки PP является её восстановление с помощью моделей, в основе которых лежит зависимость скорости фотосинтеза от подводной освещённости и биотический индекс, в качестве которого часто выступает Chl (Звалинский, 2006; Platt, Sathyendranath, 2002). Использование моделей PP позволяет получить качественные оценки этого параметра в условиях отсутствия *in situ* наблюдений (Звалинский и др., 2006; Petrenko et al. 2013). Кроме того, дистанционное зондирование цвета океана, дающее представление о концентрации Chl в подповерхностном слое, открывает большие возможности анализа пространственно-временной изменчивости модельной PP на региональных и глобальных масштабах. Однако спутнико-

вые алгоритмы восстановления концентрации Chl могут переоценивать измерения *in situ* (Буренков и др., 2000; Штрайхерт и др., 2014), что, в свою очередь, может сказаться на результатах модельных расчётов PP. Поэтому в последнее время ведётся много работ по валидации спутниковых оценок концентрации Chl и PP, а также подбора региональных алгоритмов восстановления этих двух параметров на основе спутниковых и натуральных измерений в различных районах Мирового океана (Petrenko et al. 2013; Суслин и др., 2014, Лобанова и др., 2015).

Сравнение спутниковых и *in situ* оценок концентрации Chl в водах западной части Японского моря показывает, что спутниковые данные несколько превышают натурные измерения в диапазоне низких концентраций (Yamada et al, 2005), а в отдельных районах завышение спутниковых оценок может достигать 35–200% (Штрайхерт и др., 2006).

Оценки *in situ* значений PP в водах западной части Японского моря немногочисленны (Nagata, 1998; Kwak et al., 2013; Шамбарова и др., 2015б), и её восстановление с помощью моделей представляет большой интерес. В то же время, в базе данных дистанционного зондирования цвета океана Ocean Productivity (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>) доступны готовые массивы 4 уровня модельной спутниковой PP, использование которых позволяет оценить PP Японского моря на различных пространственно-временных масштабах (Старицын и др., 2010; Шамбарова и др., 2015а; Joo et al., 2016). Одной из распространённых моделей PP является эмпирическая вертикальная обобщённая продукционная модель (Vertical Generalized Production Model – VGPM) (Behrenfeld, Falkowski, 1997), массивы данных которой также содержатся в базе Ocean Productivity. VGPM использует спутниковые информацию о концентрации Chl, температуре поверхности океана (ТПО) и фотосинтетически активной радиации (ФАР), что даёт ей ряд преимуществ по сравнению с другими моделями, требующими включения натуральных данных различных фотоадаптивных параметров. Результаты, полученные с помощью модифицированного варианта VGPM по спутниковым данным для Японского моря (Kameda, Ishizaka, 2005) показывают высокую корреляцию с *in situ* измерениями PP (Yamada et al., 2005), однако при сравнении авторы использовали всего 13 значений PP.

Недостаток исследований по валидации спутниковой PP в водах Японского моря и актуальность практического применения спутниковой информации о цвете океана определили цели представляемой работы: сравнение модельных спутниковых оценок PP с модельными натурными оценками в западной части Японского моря (35°–44° с.ш., 130°–137° в.д.), анализ получающихся ошибок и причин их возникновения.

Сравнение проведено для 120 станций. В качестве спутниковой PP использованы её оценки по модели VGPM из базы данных Ocean Productivity. Натурная PP восстанавливалась также с помощью модели VGPM и модели, разработанной в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) (Звалинский, Тищенко, 2016). В основе восстановления лежат *in situ* данные Chl, биогенных элементов, ассимиляционного числа и температуры в слое фотосинтеза. Поскольку Chl выступает главным биотическим индексом в рассматриваем-

мых моделях PP, одновременно проведено сравнение спутниковых и in situ оценок Chl в подповерхностном слое для 61 станции.

Данные и методы

В работе использованы следующие спутниковые данные: концентрация Chl [мг м^{-3}], дневная PP всего эвфотического слоя (PP_{eu}) [$\text{мг С м}^{-2} \text{день}^{-1}$] и дневная поверхностная ФАР [моль квантов $\text{м}^{-2} \text{день}^{-1}$]. Спутниковые данные концентрации Chl взяты из базы данных CCI Ocean Colour (Climate Change Initiative Ocean Colour, <http://www.esa-oceancolour-cci.org>), версия 1. Используемый массив представляет собой объединённую информацию с трёх спектрорадиометров (SeaWiFS, MODIS, MERIS) с пространственным разрешением 4×4 км и временной дискретностью – 1 день. Известно, что спутниковые оценки концентрации Chl дают представление о среднем содержании Chl в подповерхностном слое до первой оптической глубины (z_{90}), поскольку 90% излучения, выходящего из водной толщи, приходится на него, и спутниковый спектрорадиометр практически не регистрирует ниже (Smith, 1981). Спутниковые данные PP_{eu} , восстановленной по VGPM, и дневной поверхностной ФАР [моль квантов $\text{м}^{-2} \text{день}^{-1}$] взяты из базы данных Ocean Productivity. Данные имеют пространственную дискретность $0,08 \times 0,08$ град, а временную – 8 суток. Дата, к которой привязаны данные, соответствует началу 8-дневного промежутка осреднения. В работе использованы значения ФАР, измеренные спектрорадиометром MODIS.

In situ данные трёх морских экспедиций (*рис. 1*), выполненных в западной части Японского моря ($35^\circ\text{--}44^\circ$ с.ш., $130^\circ\text{--}137^\circ$ в.д.) в весенний (май) период 2004 г. (экспедиция La33) и осенний (сентябрь–октябрь) периоды 2005 и 2011 годов. (экспедиции La38 и La58 соответственно), предоставлены ТОИ ДВО РАН. В работе использованы: вертикальные профили концентрации Chl [мг м^{-3}] и главных биогенных элементов (БЭ) (азота ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$), фосфора (PO_4), кремния (Si), [ммоль м^{-3}]), величины удельной оптимальной скорости фотосинтеза или ассимиляционного числа (АЧ) [$\text{мг С (мг Chl)}^{-1} \text{ч}^{-1}$] и ТПО (верхний горизонт измерений, обычно 1–3 метра) [$^\circ\text{С}$]. Данные АЧ были доступны только для экспедиции La33 (Захарков, 2004): 28 значений для 9 станций на горизонтах 0, 30 и 50 метров. Их среднее значение составило $4,46 \text{ мг С (мг Chl)}^{-1} \text{ ч}^{-1}$, оно использовано при восстановлении PP_{eu} с помощью модели ТОИ ДВО РАН на всех станциях трёх экспедиций. Это допущение обосновано бимодальностью цветения фитопланктона в Японском море, т.е. усилением процессов первичного продуцирования в весенний и осенний периоды (Yamada et al., 2005; Joo et al., 2016).

На основании перечисленных in situ параметров для исследования рассчитаны: глубина эвфотического слоя (z_{eu}) [м], коэффициент диффузного ослабления света в морской воде (k_d) [м^{-1}], первая оптическая глубина (z_{90}) [м], среднее содержание Chl в слое до z_{90} (Chl_{90}) [мг м^{-3}], PP_{eu} по двум моделям [$\text{мг С м}^{-2} \text{день}^{-1}$], АЧ как функция ТПО для восстановления PP_{eu} по модели VGPM [$\text{мг С (мг Chl)}^{-1} \text{день}^{-1}$].

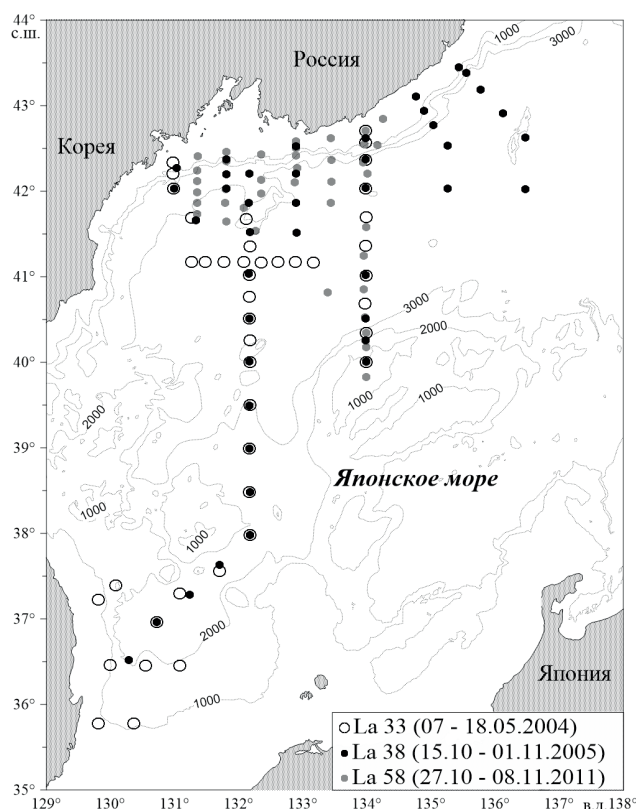


Рис.1. Схема пунктов трёх морских экспедиций ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2004, 2005 и 2011 годах, использованных в данной работе

Всего проанализирована 131 станция в открытой части моря (глубины более 200 м). Спутниковые данные, подобранные для 120 станций, проинтерполированы нами по пространству двумерной интерполяцией в точки с координатами, соответствующие натурным измерениям.

Оценка первичной продукции по натурным данным

Восстановление PP_{eu} проводилось по двум моделям: по полуаналитической модели, разработанной в ТОИ ДВО РАН, и эмпирической модели VGPM. Дневная PP [$\text{мг С м}^{-3} \text{ день}^{-1}$] по модели ТОИ ДВО РАН рассчитывалась по формуле (1) для каждого горизонта с шагом 0,5 м по глубине до z_{eu} . Дневная PP_{eu} [$\text{мг С м}^{-2} \text{ день}^{-1}$] определялась путем суммирования продукции всех её 0,5-метровых слоев. Восстановление PP_{eu} по слоям позволяет учесть вертикальный профиль Chl и подводной освещённости.

$$PP(z) = Chl(z) \times \left[P_{opt}^B \times \frac{1 + Ir(z)}{2 \times \gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times \gamma \times Ir(z)}{(1 + Ir(z))^2}} \right) \right] \times DL. \quad (1)$$

Здесь $Chl(z)$ – содержание Chl на горизонте z , [мг м^{-3}]; P_{opt}^B – АЧ, [$\text{мг С (мг Chl)}^{-1} \text{ ч}^{-1}$]; DL – долгота светового дня [ч]. Выражение в квадратных скобках описывает световую кривую

зависимости скорости фотосинтеза от подводной освещённости, где $Ir(z) = \frac{I(z)}{I_K}$ – относительная радиация, $I(z)$ – солнечная радиация на глубине z , [мк моль квантов $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$], I_K – световая константа полунасыщения, [мк моль квантов $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$], $\gamma \approx 0,95$ – параметр, определяющий форму световой кривой. $Ir(z)$ выводилась нами с учётом закона затухания света в воде, предполагая, что I_K составляет $\approx 10\%$ от поверхностной ФАР (I_0) (Звалинский, 2006):

$$Ir(z) = \frac{I(z)}{I_K} = \frac{I_0 \times \exp(-k_d \times z)}{0,1 \times I_0} = 10 \times \exp(-k_d \times z),$$

где k_d рассчитывался по формуле (Gordon, McCluney, 1975): $k_d = \frac{\ln 100}{z_{eu}} = \frac{4,6}{z_{eu}}$, а z_{eu} оценивалась на основе анализа вертикальных профилей БЭ и Chl и концентрации Chl в подповерхностном слое (Chl_{90}).

Эмпирическая модель VGPM восстанавливает дневную PP_{eu} без учёта вертикального профиля Chl по следующему соотношению:

$$PP_{eu} = Chl_{90} \times 0,66125 \times \left[P_{opt}^B \times \frac{I_0}{I_0 + 4,1} \right] \times DL \times z_{eu}, \quad (2)$$

где 0,66125 – объединяющий коэффициент, I_0 – дневная доза ФАР на поверхности океана, [моль квантов $\text{м}^{-2} \text{день}^{-1}$]. Восстановление PP_{eu} по этой модели на основе натуральных данных проводилось нами по аналогии с тем, которое представлено разработчиками базы данных Ocean productivity: АЧ рассчитывалось как функция ТПО (Behrenfeld, Falkowski, 1997), in situ данные Chl взяты средними в слое z_{90} , z_{eu} рассчитывалась с помощью алгоритма Мореля и Бертона как функция Chl_{90} . В обеих моделях в качестве I_0 использованы спутниковые данные дневной ФАР, а DL определялась с помощью астрономического алгоритма как функция широты и дня года.

Используемые модели имеют два основных различия: они основаны на световых кривых разных типов (Platt, Sathyendranath, 2002; Звалинский, 2006) и по-разному учитывают вертикальный профиль Chl и подводной освещённости. Световая кривая в формуле (1) является полуаналитической и хорошо согласуется с экспериментальными кривыми фотосинтеза для различных морских микроводорослей (Звалинский, 2006; Звалинский, Тищенко, 2016). Поэтому результаты восстановления PP_{eu} по модели ТОИ ДВО РАН могут быть сопоставимы с её in situ оценками (Звалинский и др., 2006).

В результате сформированы три массива модельных данных дневной PP_{eu} для всех исследуемых станций: спутниковые данные (модель VGPM) из базы Ocean Productivity (PP_sat); натурные данные (PP_nat), восстановленные по модели ТОИ ДВО РАН (PP_poi) и по VGPM (PP_vgpm) на основе in situ измерений входящих в них параметров. А также два массива данных Chl_{90} : in situ данные (Chl_nat) и спутниковые (Chl_sat). Сравнение натурального и спутникового Chl_{90} и модельной PP_{eu} осуществлялось с помощью корреляционного

анализа и сопоставления их осреднённых по пространству оценок и среднеквадратических отклонений.

Результаты и их обсуждение

Коэффициент корреляции (табл. 1, рис. 2) между спутниковыми и натурными оценками двух рассматриваемых параметров в целом больше 0,56. Кроме того, корреляция между двумя оценками PP_{eu} по VGPM на основе спутниковых и натуральных измерений (табл. 1, колонка 3) выше, чем между PP_{sat} и PP_{poi} (табл. 1, колонка 2), и составляет 0,45–0,77. В то время как сравнение *in situ* оценок PP_{eu} и восстановленных по VGPM на основе спутниковых данных в Японском море в 1998 и 1999 годах. (Yamada et al., 2005) показало более сильную связь ($r = 0,97$, $n = 13$). Следует отметить, что авторы использовали для сравнения всего 13 значений PP_{eu} и регионально подобранный алгоритм расчёта АЧ (Kameda, Ishizaka, 2005), используемого в VGPM.

Таблица 1. Коэффициент корреляции (r) между модельными натурными и спутниковыми оценками PP_{eu} и спутниковым и натурным оценками Chl_{90}

1	2	3	4	5
Экспедиции	$PP_{sat} - PP_{nat}$		$PP_{poi} - PP_{vgpm}$	$Chl_{sat} - Chl_{nat}$
	$PP_{sat} - PP_{poi}$	$PP_{sat} - P_{vgpm}$		
La33 (май 2004), n=40	0,35 (p<0,05)	0,45 (p<0,01)	0,60 (p<0,01)	0,84 (p<0,01, n=12)
La38 (октябрь– ноябрь 2005), n=36	0,31 (p<0,1)	0,77 (p<0,01)	0,26 (p>0,1)	0,87 (p<0,01, n=24)
La58 (октябрь– ноябрь 2011), n=44	0,29 (p<0,1)	0,68 (p<0,01)	0,30 (p<0,05)	0,31 (p>0,1, n=25)
Все станции, n=120	0,56 (p<0,01)	0,63 (p<0,01)	0,71 (p<0,01)	0,58 (p<0,01, n=61)

Несмотря на сильную корреляцию ($r = 0,84 - 0,87$) Chl_{sat} и Chl_{nat} в отдельные сезоны (табл. 1, колонка 5), степень связи для всех станций между ними остаётся средней ($r = 0,58$). Возможно, из-за умеренной корреляции в осенний период 2011 г. Данные для экспедиций La 33 и La 38 хорошо соотносятся с результатами валидации спутниковых среднемесячных оценок Chl_{90} с *in situ* измерениями в Японском море в 1998–2002 гг. (Yamada et al., 2005), когда r для 202 станций составил 0,80. Графики корреляционных связей спутниковых и натуральных оценок Chl_{90} и модельных PP_{eu} представлены на рис. 2.

Сопоставление спутниковых и натуральных оценок, проведённое с помощью сравнения математического ожидания и среднеквадратического отклонения для всех станций в целом (табл. 2, последняя строка), показало, что Chl_{sat} лишь немногим выше Chl_{nat} , хотя в отдельные периоды различие между ними может достигать 1,5–1,7 раз, что также отмечается в работе (Штрайхерт и др., 2006). При этом имеет место как завышение Chl_{sat} относитель-

но Chl_nat (весна 2004 г., осень 2005 г.), так и наоборот (осень 2011 г.). PP_sat , средние для всех станций, ниже PP_roi , но выше PP_vgpm (табл. 2, последняя строка; рис. 2а, б). При осреднении различие между ними также невелико, однако в отдельные периоды составляет 1,4–1,7 раз. Следует отметить, что спутниковая и натурная PP_{ei} по VGPM в среднем хорошо согласуются друг с другом при значениях менее $1000 \text{ мг С м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ (рис. 2б).

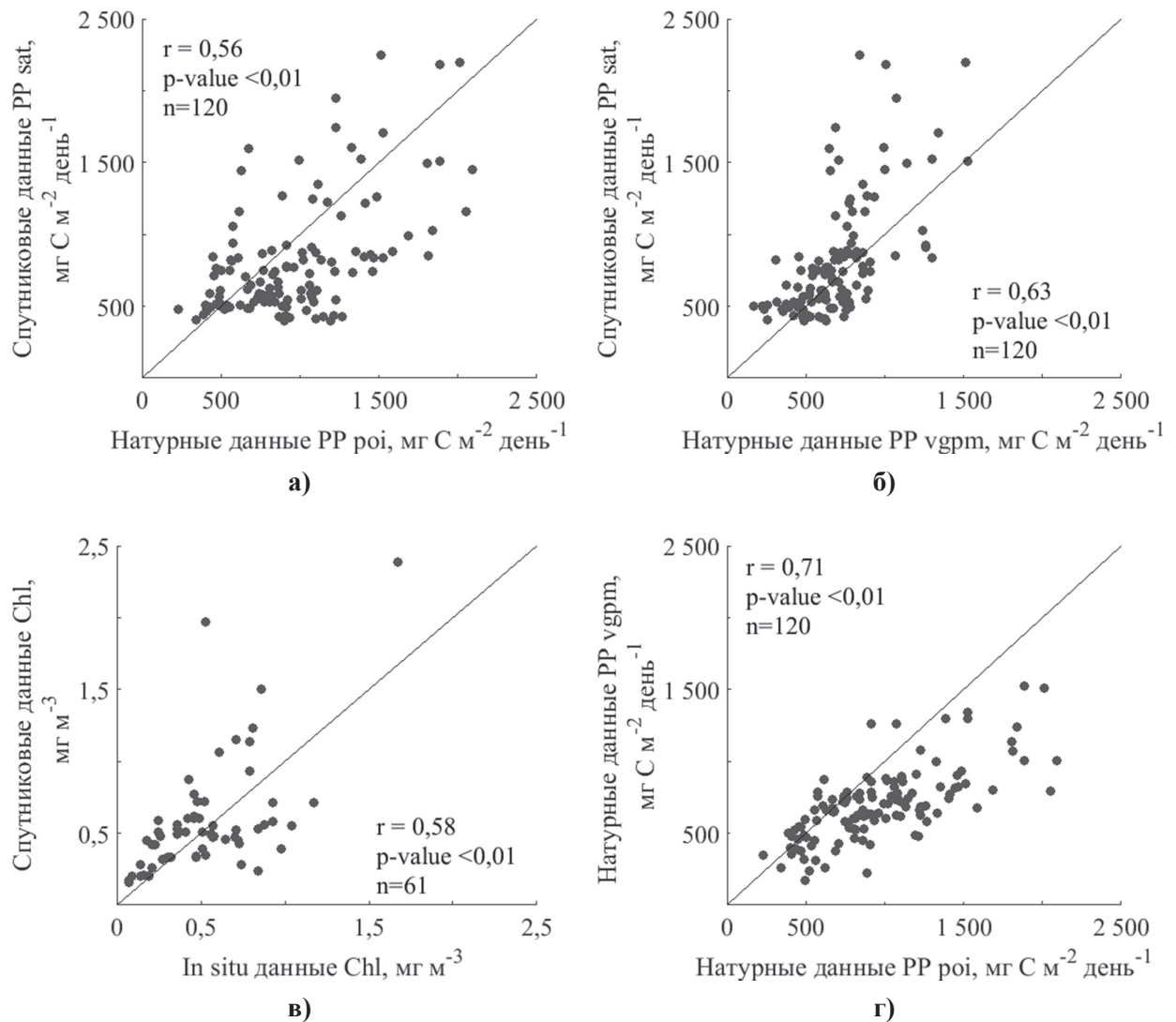


Рис. 2. Корреляционная связь модельных спутниковых и натурных оценок PP_{ei} , восстановленных по модели ТОИ ДВО РАН (а) и VGPM (б); натурных модельных оценок PP_{ei} между собой (в); спутниковых и in situ оценок Chl (г). Диагональ – линия совпадения данных

Обращает на себя внимание следующая закономерность: в те периоды, когда Chl_sat выше (ниже) Chl_nat , PP_sat также выше (ниже) PP_vgpm . Различие между спутниковыми и in situ оценками Chl определяет различие между модельными спутниковыми и натурными оценками PP_{ei} , когда Chl является главным амплитудным множителем в моделях PP . Взаимосвязь между спутниковыми оценками Chl и in situ значениями PP_{ei} также обсуждена в (Yamada et al., 2005). Авторы делают вывод о том, что при низких спутниковых оценках Chl наблюдаются более высокие значения модельной спутниковой PP_{ei} по сравнению

с натурными данными. По результатам нашего исследования видно, что в осенние экспедиции средние оценки Chl_{sat} довольно низкие (0,46–0,47 мг м⁻³) по сравнению с майскими значениями. Однако предположение (Yamada et al., 2005) выполняется только для экспедиции La38.

Таблица 2. Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение PP_{eu} [мг С м-2 день-1] и Chl_{90} [мг м-3] по спутниковым и натурным оценкам

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Экспедиции</i>	<i>PP_{nat}</i>		<i>PP_{sat}</i>	<i>Chl_{nat}</i>	<i>Chl_{sat}</i>
	<i>PP_{poi}</i>	<i>PP_{vgpm}</i>			
La33 (май 2004), n=40	1318±382	889±239	1226±435	0,63±0,38 (n=12)	1,09±0,59 (n=12)
La38 (октябрь–ноябрь 2005), n=36	548±142	482±169	645±182	0,34±0,22 (n=24)	0,47±0,24 (n=24)
La58 (октябрь–ноябрь 2011), n=44	984±227	702±178	585±138	0,67±0,22 (n=25)	0,46±0,11 (n=25)
Все станции, n=120	964±409	698±256	817±405	0,53±0,30 (n=61)	0,59±0,40 (n=61)

Известно, что для Японского моря характерны весенний и осенний пики первичного продуцирования фитопланктона (Yamada et al., 2005; Joo et al., 2016), которые связаны с процессами зимнего конвективного перемешивания и разрушения летней стратификации, способствующими пополнению эвфотического слоя БЭ. Кроме того, имеет место межгодовая изменчивость этих двух пиков (Joo et al., 2016). Из табл. 2 видно, что различие двух модельных натуральных оценок PP_{eu} между осенними экспедициями в 2005 и 2011 годах (La38 и La58 соответственно) составляет 1,5–1,8 раза. Спутниковые оценки также имеют межгодовую динамику в рассматриваемый период, однако не столь значительную. Следует отметить, что во время экспедиции La38 PP_{sat} несколько выше PP_{poi} , а во время La58 PP_{sat} сильно ниже PP_{poi} . Что же определяет различие между PP_{sat} и PP_{poi} ?

Для La 58 характерна более сильная стратификация вод и более высокие значения концентрации Chl в эвфотическом слое. Градиент в осреднённом для всех пунктов наблюдений вертикальном профиле Chl составляет 0,6 мг м⁻⁴, при этом максимум находится на глубине 24–25 м, а средняя z_{90} – около 9 м. Это говорит о том, что большая часть Chl в эвфотическом слое остаётся «недоступной» для спутникового спектрорадиометра и не учитывается при восстановлении PP_{eu} с помощью VGPM как по спутниковым, так и по натурным данным. Поскольку, согласно VGPM, концентрация Chl с глубиной не меняется, и общее содержание Chl в эвфотическом слое (Chl_{eu}) оценивается как: $Chl_{eu} = Chl_{90} \times z_{eu}$. Это может приводить к более низким модельным значениям PP_{sat} по сравнению с PP_{poi} (табл. 2, сравнение колонок 2 и 4 для La58). La38 характеризуется меньшей стратификацией и более низкими концентрациями Chl , а градиент в осреднённом для всех пунктов вертикальном профиле Chl практически отсутствует (0,1 мг м⁻⁴). В таком случае большой разницы между оценками Chl_{eu} по PP_{sat} и PP_{poi} не будет, и модельные оценки PP_{eu} могут

не сильно отличаться друг от друга, что видно из *табл. 2* (сравнение колонок 2 и 4 для La38).

Однако PP_{sat} для экспедиции La38 всё же незначительно выше чем PP_{roi} . Завышенные спутниковые оценки PP_{eu} при низких натуральных значениях могут объясняться в том числе и завышенными оценками модельного АЧ (Yamada et al., 2005), используемого в моделях PP. Напомним, что АЧ в PP_{sat} и PP_{vgpm} восстанавливается как функция ТПО и для La 38 является максимальным из трёх экспедиций – $5,69 \text{ мг С (мг Chl)}^{-1} \text{ ч}^{-1}$, превышая на 1,23 *in situ* АЧ в PP_{roi} . Такая переоценка при незначительном отличии между спутниковыми и натурными Chl_{eu} и Chl_{90} привела к завышенной оценке PP_{sat} относительно PP_{roi} . Средние значения модельных АЧ для двух других экспедиций соизмеримы с *in situ* АЧ так же, как и среднее значение для всех станций в целом. Тем не менее в отдельных пунктах модельное АЧ достигает минимальных значений 2,75 и максимальных – $6,53 \text{ мг С (мг Chl)}^{-1} \text{ ч}^{-1}$.

Следует также отметить, что ТПО не является единственным фактором, влияющим на изменчивость АЧ, которое также зависит от концентрации Chl, вида фитопланктона и размера фитопланктонных ячеек (Kameda, Ishizaka, 2005; Marra et al., 2007), освещённости, обеспечения БЭ и др. (Ведерников, 1982). Кроме того, АЧ как функция ТПО в спутниковых моделях PP отражает фотоадаптивные свойства сообществ морского фитопланктона только в приповерхностном слое океана, так как методы спутникового определения ТПО ограничены физическими законами распространения инфракрасного излучения в воде. Моделирование АЧ как функции ТПО в некоторых случаях может не учитывать смещение слоя оптимальных световых условий для фотосинтеза на более низкие глубины, что обычно вызывается высокой поверхностной ФАР. Поэтому использование температурных алгоритмов АЧ в моделях интегральной PP всего эвфотического слоя может приводить к ошибкам её восстановления (Milutinović, Bertino, 2011).

Заключение

Таким образом, результаты сравнения обнаруживают среднюю связь между модельными спутниковыми и натурными оценками PP_{eu} и натурными и спутниковыми оценками концентрации Chl в подповерхностном слое. Корреляция между оценками PP_{sat} и PP_{nat} для всех станций составляет 0,56–0,63, а между Chl_{sat} и Chl_{nat} – 0,58. Однако для некоторых экспедиций она достигает 0,68–0,77 для PP_{eu} и 0,84–0,87 для Chl. Средние для всех станций оценки показывают, что различие между спутниковыми и натурными данными двух рассматриваемых параметров невелико. Хотя для отдельных экспедиций оно может достигать в 1,5–1,7 раз. Chl_{sat} в среднем выше Chl_{nat} , в то время как PP_{sat} ниже PP_{roi} , но выше PP_{vgpm} .

Поскольку VGPM и все другие доступные спутниковые модели PP_{eu} не учитывают вертикальный профиль Chl в пределах эвфотического слоя, различие в оценках PP_{sat} и PP_{roi} можно объяснить в первую очередь особенностью вертикального распределения

Chl: в тех ситуациях, когда максимум Chl лежит ниже z_{90} и имеет место сильный вертикальный градиент, характерный для стратифицированных вод, спутниковая VGPM даёт более низкие оценки PP_{eu} по сравнению с натурными моделями, учитывающими вертикальный профиль Chl. В то время как в перемешанных водах, в которых концентрация Chl распределена практически равномерно, спутниковая VGPM даёт схожие оценки PP_{eu} . Величины АЧ, используемые в моделях PP_{eu} , могут вносить свой вклад в различие модельных оценок, когда вертикальный градиент Chl в слое фотосинтеза не столь выражен.

Сравнение спутниковой и натурной PP_{eu} , восстановленной с помощью моделей, не учитывающих вертикальный профиль Chl (сравнение PP_{sat} и PP_{vgpm}), показало, что различие между ними в первую очередь объясняется различием спутниковых и натуральных оценок главного амплитудного множителя моделей – подповерхностной концентрации Chl.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ мол_нр 15-35-50443 и частичной поддержке грантов РФФИ: А 15-05-03796 и 16-05-00452.

Литература

1. Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Ведерников В.И. Подспутниковые измерения цвета океана: верификация спутниковых данных сканера цвета SeaWiFS // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 3. С. 357–362.
2. Ведерников В.И. Ассимиляционное число и пределы его колебаний в культурах и природных популяциях планктонных водорослей // *Океанический фитопланктон и первичная продукция*. М.: Наука, 1982. С. 92–112.
3. 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.
4. Звалинский В.И. Формирование первичной продукции в море // *Известия ТИНРО*. 2006. Т. 147. С. 276–302.
5. 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.
6. Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 4. С. 1–15.
7. Лобанова П.В., Баимачников И.Л., Бротаин В. Анализ моделей первичной продукции на основе спутниковых данных в северо-восточной части Атлантического океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 2. С. 114–126.
8. Старицын Д.К., Фукс В.Р., Колдунов А.В. Дивергенции течений и формирование зон повышенной биологической продуктивности в японском море на основе спутниковых данных // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География*. 2010. № 4. С. 58–73.
9. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Джулай А.А., Мончева С., Слабакова В., Кривенко О.В., Ефимова Т.В., Салюк П.А. Региональный алгоритм восстановления концентрации Хлорофилла «а» и коэффициента поглощения света неживым органическим веществом на длине волны 490 нм в черном море для спектральных каналов цветковых сканеров MODIS и MERIS // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2014. № 28. С. 303–319.
10. Шамбарова Ю.В., Стёпочкин 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*. 2015а. Т. 12. № 1. С. 80–92.
11. Шамбарова Ю.В., Стёпочкин И.Е., Захарков С.П. Первичная продукция северо-западной части японского моря по спутниковым и «in-situ» данным // *Pontus Euxinus 2015: тезисы IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (с международным участием) по проблемам водных экосистем, посвященной 100-летию со дня рождения В.Н. Грезе*. 2015б. С. 196–197.
12. Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Гордейчук Т.Н., Шамбарова Ю.В. Концентрация Хлорофилла-а и биооптические характеристики в заливе Петра Великого (Японское море) во время зимне-весеннего цветения фитопланктона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 1. С. 148–162.
13. Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Дьяков С.Е. Коррекция спутниковых оценок концентрации Хлорофилла-а для Японского моря // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 6. С. 72–82.
14. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration // *Limnology and Oceanography*. 1997. Vol. 42 (1). P. 1–20.
15. Gordon H.R., McCluney W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // *Applied Optics*. 1975. Vol. 14. P. 413–416.

16. Joo H.T., Son S.H., Park J.-W., Kang J.J., Jeong J.-Y., Lee C.I., Kang C.K., Lee S.H. Long-Term Pattern of Primary Productivity in the East/Japan Sea Based on Ocean Color Data Derived from MODIS-Aqua // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8 (25). DOI: 10.3390/rs8010025.
17. Kameda T., Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by the two-phytoplankton community model applicable for ocean color remote sensing // *Journal of Oceanography*. 2005. Vol. 61. P. 663–672.
18. Kwak J.H., Lee S.H., Park H.J., Choy E.J., Jeong H.D., Kim K.R., Kang C.K. Monthly measured primary and new productivities in the Ulleung Basin as a biological “hot spot” in the East/Japan Sea // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 4405–4417. DOI: 10.5194/bg-10-4405-2013.
19. Marra J., Trees C.C., O'Reily J.E. Phytoplankton pigment absorption: a strong predictor of primary productivity in the surface ocean // *Deep-Sea Research I*. 2007. Vol. 54. P. 155–163.
20. Milutinović S., Bertino L. Assessment and propagation of uncertainties in input terms through an ocean-color-based model of primary productivity // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. P. 1906–1917.
21. Nagata H. Seasonal changes and vertical distributions of chlorophyll-a and primary productivity at the Yamato Rise, central Japan Sea // *Plankton Biology and Ecology*. 1998. Vol. 45. P. 159–170.
22. Petrenko D., Pozdnyakov D., Sychov V., Johannessen J., Counillon F. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the arctic ocean // *International Journal of Remote Sensing*. 2013. Vol. 34 (11). P. 3903–3937.
23. Platt T., Sathyendranath S. Modelling marine primary production. Halifax, Nova Scotia, 2002. 280 p.
24. Smith R.C. Remote sensing and depth distribution of ocean chlorophyll // *Marine ecology – Progress series*. 1981. Vol. 5. P. 359–361.
25. Yamada K., Ishizaka J., Nagata H. Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002 // *Journal of Oceanography*. 2005. Vol. 61. P. 857–869.

Primary production of phytoplankton and concentration of chlorophyll-a in the western part of the Japan/East Sea from remote sensing and field data

P.V. Lobanova¹, V.I. Zvalinski², P.Ya. Tishchenko²

¹*St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg 199034, Russia*
E-mail: pl19@mail.ru

²*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok 690041, Russia*
E-mail: tpavel@poi.dvo.ru

Remote sensing of ocean colour allows to analyze spatial and temporal variability of chlorophyll-a concentration (Chl) in a subsurface layer and estimate primary production of phytoplankton (PP) at regional and global scales. However, improvement of remote sensing algorithms requires systematical validation of satellite data by in situ observations. In this work, we compare satellite-derived and field estimates of Chl and modeled PP in the western part of the Japan/East Sea (35–44° N, 130–137° E) in spring 2004 and autumn 2005 and 2011. As satellite PP we use its VGPM estimates from Ocean Productivity database. Field PP is calculated on the base of in situ observations of Chl, assimilation value, diffuse attenuation coefficient and sea surface temperature using two models: VGPM and a model developed in V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute (POI). Comparison shows fair correlation between satellite-derived and field data: $r = 0.56 - 0.63$ for modeled PP and $r = 0.58$ for Chl. Their averaged estimates for all stations of observation have small difference, which, however, may be about 1.5–1.7 times in some periods. On average, satellite Chl overestimates in situ observations, while satellite estimates of PP are less than PP calculated with the use of the model developed by POI but greater than PP calculated using VGPM. The difference between modeled satellite and field PP estimates is due to features of vertical distribution of Chl within the euphotic zone and the difference in values of assimilation number used in the models.

Keywords: chlorophyll-a concentration, primary production, models of primary production, the Japan/East Sea, ocean colour, remote sensing

Accepted: 13.04.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-135-147

References

1. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vedernikov V.I., Podsputnikovye izmereniya tsveta okeana: verifikatsiya sputnikovykh dannykh skanera tsveta SeaWiFS (Sub-satellite ocean color measurements: verification of satellite data colour scanner SeaWiFS), *Okeanologiya*, 2000, Vol. 40, No. 3, pp. 357–362.
2. Vedernikov V.I., Assimilyatsionnoe chislo i predely ego kolebaniy v kul'turakh i prirodnykh populyatsiyakh planktonnykh vodoroslei (Assimilation number and the limits of its variations in cultures and natural populations of plankton algae), In: *Okeanicheskiy fitoplankton i pervichnaya produktsiya* (Ocean phytoplankton and primary production), Moscow: Nauka, 1982, pp. 92–112.
3. Zakharkov S.P., Otchet gidrobiologicheskogo otryada (Report of hydro biological team), In: *Nauchnyi otchet ob ekspeditsii TOIDVO RAN na NIS "Akademik M.A. Lavrent'ev"* (Scientific report of cruise on SRS "Academician M.A. Lavrent'ev"), cruise No. 33, Vladivostok: POI, 2004.
4. Zvalinskii V.I., Formirovaniye pervichnoi produktsii v more (Process of primary production in the sea), *Izvestiya TINRO*, 2006, Vol. 147, pp. 276–302.
5. Zvalinskii V.I., Lobanov V.B., Zakharkov S.P., Tishchenko P.Ya., Khlороfill, zamedlennaya fluorestsentsiya i pervichnaya produktsiya v severo-zapadnoi chasti Yaponskogo morya osen'yu 2000 (Chlorophyll, Delayed Fluorescence and Primary Production in Northwest Part of the Japan Sea in Autumn of 2000), *Okeanologiya*, 2006, Vol. 46, No. 1, pp. 27–37.
6. Zvalinskii V.I., Tishchenko P.Ya., Modelirovaniye fotosinteza i rosta morskogo fitoplanktona (Simulation of photosynthesis and growth of marine phytoplankton), *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 4, pp. 1–15.
7. Lobanova P.V., Bashmachnikov I.L., Brotash V., Analiz modelei pervichnoi produktsii na osnove sputnikovykh dannykh v severo-vostochnoi chasti Atlanticheskogo okeana (Validation of satellite derived primary production models in the Northeast Atlantic), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 114–126.
8. Staritsyn D.K., Foux V.R., Koldunov A.V., Divergentsii techenii i formirovaniye zon povyshennoi biologicheskoi produktivnosti v yaponskom more na osnove sputnikovykh dannykh (Divergences currents and the formation of zones of high biological productivity in the Japan/East Sea on the basis of satellite data), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser.7, Geologiya. Geografiya*, 2010, No. 4, pp. 58–73.
9. Suslin V.V., Churilova T.Ya., Dzhulai A.A., Moncheva S., Slabakova V., Krivenko O.V., Efimova T.V., Salyuk P.A., Regional'nyi algoritm vosstanovleniya kontsentratsii khlorofilla "a" i koeffitsienta pogloshcheniya sveta nezhyvym organicheskim veshchestvom na dline volny 490 nm v chernom more dlya spektral'nykh kanalov tsvetovykh skanerov MODIS i MERIS (Regional reconstruction algorithm concentration of chlorophyll "a" and the light absorption coefficient of dead organic matter at a wavelength of 490 nm in the Black Sea for the spectral channels MODIS and MERIS color scanners), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon moray*, 2014, No. 28, pp. 303–319.
10. Shambarova Yu.V., Steepochkin I.E., Zakharkov S.P., Issledovaniye izmenchivosti pervichnoi produktsii v Yaponskom more po sputnikovym dannyim na osnove EOF-analiza (Study of the net primary production variability in the Japan Sea from satellite data using EOF-analysis), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015a, Vol. 12, No. 1, pp. 80–92.
11. Shambarova Yu.V., Steepochkin I.E., Zakharkov S.P., Pervichnaya produktsiya severo-zapadnoi chasti yaponskogo morya po sputnikovym i "in-situ" dannyim (Primary production of the northwestern part of the Japan/East Sea on the satellite and the in-situ data), In: *Pontus Euxinus 2015: IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh (s mezhdunarodnym uchastiem) po problemam vodnykh ekosistem, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.N. Greze* (Pontus Euxinus 2015: abstracts IX all-Russian scientific-practical conference of young scientists (with international participation) on the problems of aquatic ecosystems, dedicated to the 100th anniversary of V.N. Greze), 2015b, pp. 196–197.
12. Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P., Gordeichuk T.N., Shambarova Yu.V., Kontsentratsiya khlorofilla-a i bio-opticheskie kharakteristiki v zalive Petra Velikogo (Yaponskoe more) vo vremya zimne-vesennego tsveteniya fitoplanktona (Chlorophyll-a concentration and bio-optical characteristics in the Peter the Great Bay (Sea of Japan) during winter-spring phytoplankton bloom), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 148–162.
13. Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P., D'yakov S.E., Korrektsiya sputnikovykh otsenok kontsentratsii khlorofilla-a dlya Yaponskogo morya (Correction of satellite estimates of chlorophyll-a concentration for the Sea of Japan), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 6, pp. 72–82.
14. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G., Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 1997, Vol. 42 (1), pp. 1–20.
15. Gordon H.R., McCluney W.R., Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing, *Applied Optics*, 1975, Vol. 14, pp. 413–416.
16. Joo H.T., Son S.H., Park J.-W., Kang J.J., Jeong J.-Y., Lee C.I., Kang C.K., Lee S.H., Long-Term Pattern of Primary Productivity in the East/Japan Sea Based on Ocean Color Data Derived from MODIS-Aqua, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8 (25), DOI: 10.3390/rs8010025.
17. Kameda T., Ishizaka J., Size-fractionated primary production estimated by the two-phytoplankton community model applicable for ocean color remote sensing, *Journal of Oceanography*, 2005, Vol. 61, pp. 663–672.
18. Kwak J.H., Lee S.H., Park H.J., Choy E.J., Jeong H.D., Kim K.R., Kang C.K., Monthly measured primary and new productivities in the Ulleung Basin as a biological "hot spot" in the East/Japan Sea, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, pp. 4405–4417. DOI: 10.5194/bg-10-4405-2013.
19. Marra J., Trees C.C., O'Reily J.E., Phytoplankton pigment absorption: a strong predictor of primary productivity in the surface ocean, *Deep-Sea Research I*, 2007, Vol. 54, pp. 155–163.
20. Milutinović S., Bertino L., Assessment and propagation of uncertainties in input terms through an ocean-color-based model of primary productivity, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 1906–1917.

21. Nagata H., Seasonal changes and vertical distributions of chlorophyll-a and primary productivity at the Yamato Rise, central Japan Sea, *Plankton Biology and Ecology*, 1998, Vol. 45, pp. 159–170.
22. Petrenko D., Pozdnyakov D., Sychov V., Johannessen J., Counillon F., Satellite-derived multi-year trend in primary production in the arctic ocean, *International Journal of Remote Sensing*, 2013, Vol. 34 (11), pp. 3903–3937.
23. Platt T., Sathyendranath S., *Modelling marine primary production*, Halifax, Nova Scotia, 2002, 280 p.
24. Smith R.C., Remote sensing and depth distribution of ocean chlorophyll, *Marine ecology – Progress series*, 1981, Vol. 5, pp. 359–361.
25. Yamada K., Ishizaka J., Nagata H., Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002, *Journal of Oceanography*, 2005, Vol. 61, pp. 857–869.