

## Анализ моделей первичной продукции на основе спутниковых данных в северо-восточной части Атлантического океана

П.В. Лобанова<sup>1</sup>, И.Л. Башмачников<sup>2,1</sup>, В. Броташ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> MARE – Marine and Environmental Sciences Centre / Centro de Oceanografia,  
Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal  
E-mail: igorb@fc.ul.pt

При всем многообразии моделей, применяемых для расчета первичной продукции на основе спутниковых данных, остается проблема выбора той или иной модели, наиболее корректно описывающей особенности процессов первичного продуцирования исследуемого региона. Учет региональных особенностей может существенно увеличить степень соответствия модели натурным наблюдениям. В данной работе первичная продукция в северо-восточной части Атлантического океана – СВАО (20°–51° с.ш., 10°–40° з.д.) – рассчитана в период с 1998 по 2005 гг. с использованием региональных фотосинтетических параметров по трем известным моделям: на основе спутниковых данных о концентрации хлорофилла-а (модели VGPM и VIOM) и на основе спутниковых данных о коэффициенте поглощения света фитопланктоном (модель Aph-PP). Проведено сравнение абсолютных значений модельных данных между собой и натурными измерениями в СВАО.

В основу расчетов взяты новые восьмидневные массивы спутниковых данных третьего уровня по цвету океана, предоставленные проектом CCI Ocean Color (<http://www.esa-oceancolour-cci.org>). Фотосинтетические параметры подобраны регионально из литературы с учетом фотосинтетических условий и видового состава фитопланктона СВАО.

Сравнение пространственного распределения модельных данных между собой показало схожесть пространственных структур несмотря на различия в абсолютных значениях. Из трех выбранных моделей модель VIOM наиболее точно описывает характер изменчивости первичной продукции в СВАО в пространстве и по сезонам, несколько занижая значения первичной продукции.

Использование в данной работе региональных параметров, отражающих особенности фотосинтеза экосистемы СВАО, способствовало приближению модельных результатов к действительным процессам фотосинтеза в исследуемом регионе.

**Ключевые слова:** модели первичной продукции, северо-восточная часть Атлантического океана, спутниковые данные, хлорофилл-а, коэффициент абсорбции света фитопланктоном

### Введение

В процессе фотосинтеза фитопланктон, поглощая солнечную энергию, трансформирует углекислый газ в органическое вещество, которое расходуется потом на функционирование всех биологических сообществ. Оценить прирост количества органического вещества возможно с помощью первичной продукции (Демидов, Мошаров, 2013), которая является важным критерием состояния экосистемы Мирового океана. Суточную первичную продукцию, интегрированную по глубине фотического слоя, определяют в ходе судовых экспедиций, а также рассчитывают с помощью моделей на основе спутниковых данных.

При всем многообразии спутниковых моделей, применяемых для расчета первичной продукции (Morel, 1991; Lee, 1996; Behrenfeld, 1997; Behrenfeld, 2005; Smyth, 2005; Marra, 2007; Tilstone, 2009, 2013; Mélin, 2011; Kahru, 2014), остается проблема выбора той или иной модели для конкретной акватории с учетом влияния на процессы фотосинтеза региональных гидрооптических и биотических условий. Поэтому для корректного

описания функционирования экосистем и хорошего соответствия натурным наблюдениям необходимо, чтобы спутниковые модели учитывали региональные особенности процессов первичного продуцирования. В то же время спутниковая информация позволяет охватить значительные временные и пространственные масштабы при хорошем пространственно-временном разрешении и потенциально способна решать более широкий круг научных вопросов, чем ограниченные серии судовых наблюдений.

По основному биотическому компоненту модели расчета первичной продукции можно разделить на модели, основанные на концентрации хлорофилла-а или на концентрации углерода (Behrenfeld, 2005; Демидов, Мошаров, 2013), а также на модели, основанные на коэффициенте поглощения света фитопланктоном (Lee, 1996; Marra, 2007; Kahru, 2014).

В данной работе первичная продукция в северо-восточной части Атлантического океана – СВАО (20°–51° с.ш., 10°–40° з.д.) – рассчитана в период 1998–2005 гг. с использованием региональных фотосинтетических параметров по трем известным моделям: на основе спутниковых данных о концентрации хлорофилла-а (модели VGPM и BIOM) и на основе спутниковых данных о коэффициенте поглощения света фитопланктоном (модель Aph-PP). Проведено сравнение абсолютных значений модельных данных между собой и натурными измерениями.

## Методы и данные

### *Модели первичной продукции*

Для сравнения выбраны три модели первичной продукции. Две из них основаны на концентрации хлорофилла-а. Это обобщенная по вертикали модель VGPM (Vertically Generalized Production Model) (Behrenfeld, 1997) и модель BIOM (Bedford Institute of Oceanography Model), разработанная в Бедфордском институте океанографии (Platt, 1988; Kyewalyanga, 1992; Финенко, 2009; Dogliotti, 2014). В основу третьей модели Aph-PP (Absorption Based Model) (Lee, 1996; Marra, 2007; Kahru, 2014) входит коэффициент поглощения света фитопланктоном на длине волны 443 нм, который также рассчитывается из информации по цветности океана, регистрируемой спутником.

Обобщенная по вертикали модель первичной продукции VGPM позволяет рассчитать среднесуточную первичную продукцию в колонке воды  $P_{ZT}$  с учетом величины оптимальной фиксации углерода  $P_{opt}^B$  [мгС (мг Chl-a)<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup>]. Этот параметр может быть определен опытным путем, но в данной модели он рассчитывается эмпирически по температуре поверхности океана (Behrenfeld, 1997).

$$P_{ZT} = Chla \times P_{opt}^B \times DL \times \left[ \left( 0,66125 \times \frac{I_0}{I_0 + 4,1} \right) \times Z_{eu} \right]. \quad (1)$$

где:  $Chla$  – концентрация хлорофилла-а в верхнем слое [мг Chl-а м<sup>-3</sup>],  $DL$  – длина дня [ч],  $I_0$  – фотосинтетически активная солнечная радиация на поверхности океана, осредненная за день - ФАР [моль частиц м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>],  $Z_{eu}$  – глубина фотического слоя [м].

Так как скорость фотосинтеза не постоянна по глубине, в модель вводится специальная «свето-зависимая» функция – «volume function» (Behrenfeld, 1997; Dogliotti, 2014), позволяющая оценить первичную продукцию, проинтегрированную в колонке воды до глубины фотического слоя. В формуле (1) эта функция выражена двумя последними членами, заключенными в квадратные скобки.

Разработанная в Бедфордском институте океанографии модель BIOM (Dogliotti, 2014) так же, как и VGPM, основана на концентрации хлорофилла-а, но она имеет более сложную структуру и включает в себя несколько фотосинтетических параметров: максимальная удельная скорость фотосинтеза при оптимальном освещении или ассимиляционное число  $P_{max}^B$  [мгС (мг Chl-а)<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup>], начальный угол фотосинтетической кривой  $\alpha^B$  [мгС (мг Chl-а)<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup> (мк моль частиц м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>] и параметр фотоингибиции  $\beta^B$  [мгС (мг Chl-а)<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup> (мк моль частиц м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>]. Первичная продукция на заданной глубине  $P_z$  рассчитывается по формуле:

$$P_z = Chla \times P_{max}^B \times DL \times \left[ \left( 1 - \exp\left(-\frac{\alpha^B}{P_{max}^B} \times I_z\right) \right) \times \exp\left(-\frac{\beta^B}{P_{max}^B} \times I_z\right) \right], \quad (2)$$

$I_z$  в формуле (2) – это значение ФАР на глубине  $z$  и может быть выражено как экспоненциальное убывание поверхностной радиации:

$$I_z = I_0 \times \exp(-K_d \times z), \quad (3)$$

где  $K_d$  – коэффициент затухания солнечной радиации в морской воде на длине волны 490 нм [м<sup>-1</sup>].

Как уже было сказано выше, модель Aph-PP основана не на концентрации хлорофилла-а, а на коэффициенте поглощения света фитопланктоном на длине волны 443 нм. Согласно авторам модели, она имеет одно главное преимущество – минимизирует влияние поглощения цветного растворенного органического вещества, которое, как и хлорофилл-а, поглощает свет в синем диапазоне спектра (Kahru, 2014).

Кроме того, в модель вводится параметр квантового выхода фотосинтеза  $\varphi$  – число молекул углекислого газа, ассимилированных фитопланктоном в расчете на каждый поглощенный им квант света. Квантовый выход фотосинтеза зависит от ФАР и может быть выражен как (Kiefer, 1983):

$$\varphi_z = \varphi_{max} \times \frac{K_\varphi}{K_\varphi + I_z}, \quad (4)$$

где  $\varphi_{max}$  – максимальный выход фотосинтеза [мг С (моль частиц)<sup>-1</sup>], а  $K_\varphi$  – значение ФАР, при котором квантовый выход фотосинтеза равен половине своего максимального значения [моль частиц м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>]. Авторы модели рекомендуют значение  $K_\varphi$ , полученное в ходе экспериментов над фитопланктонными водорослями при ограниченных биогенных и световых условиях, при конкретном значении  $\varphi_{max}$  (Lee, 1996; Kiefer, 1983). Но, так как в нашем исследовании использовалось другое значение  $\varphi_{max}$ , более близкое к условиям экосистемы СВАО, то из литературных источников (Johnson, 2000) было подобрано соответствующее значение  $K_\varphi$ .

Учитывая формулу (4), значение первичной продукции на глубине  $z$  в модели Aph-PP рассчитывается следующим образом:

$$P_z = \varphi_z \times [aph \times I_z] \times \exp(-\beta^B \times I_z), \quad (5)$$

где  $aph$  – коэффициент поглощения света фитопланктоном на длине волны 443 нм [м<sup>-1</sup>],  $I_z$  – значение ФАР на глубине  $z$ , которое так же, как и в (2), рассчитывается по формуле (3).

Как видно из формул (2) и (5), модели BIOM и Aph-PP учитывают условие фотоингибиции.

Модели BIOM и Aph-PP позволяют рассчитать первичную продукцию на глубине  $z$ . Поэтому для сравнения с VGPM они были аналитически проинтегрированы по глубине фотического слоя. Расчет глубины фотического слоя проводился двумя способами: по формуле Morel и Berthon (Morel, 1989), применяемой в VGPM, а также из соотношения, связывающего глубину фотического слоя с оптической глубиной и коэффициентом затухания солнечной радиации в морской воде (Gordon, 1975). В работе использовалось среднее значение между результатами по двум методам расчета.

Фотосинтетические параметры для моделей BIOM и Aph-PP выбирались максимально приближенными к наблюдаемым в СВАО. Параметр максимального квантового выхода фотосинтеза, параметр фотоингибиции, ассимиляционное число и начальный угол фотосинтетической кривой подобраны регионально из литературы, посвященной исследованиям в северо-восточной Атлантике (Platt, 1980; Babin, 1996; Morel, 1996; Kyewalyanga, 1998; Smyth, 2005; Picart, 2013; Suggett, 2001). Значение параметра фотоингибиции взято из (Platt, 1980) и использовалось одинаковым для всех точек расчета первичной продукции. Значения остальных фотосинтетических параметров, полученные в различные сезоны (весна, лето, осень) в ходе нескольких научных экспедиций в период с 1992 по 2002 гг., были осреднены и использовались в моделях как постоянные величины. Для осреднения взяты 29 значений ассимиляционного числа, 12 значений начального угла фотосинтетической кривой и 13 значений максимального квантового выхода фотосинтеза.

По трем описанным выше моделям сформированы восьмидневные ряды первичной продукции в период 1998 г. по 2005 гг. с пространственной дискретностью 4×4 км.

### *Спутниковые данные*

В основу расчетов по всем моделям взяты новые восьмидневные массивы спутниковых данных 3-го уровня, предоставленные проектом CCI Ocean Color и доступные на сайте <http://www.esa-oceancolour-cci.org>. Используемые массивы представляют собой объединенную информацию с трех спутников (SeaWiFS, MODIS, MERIS) с пространственным разрешением  $4 \times 4$  км и включают в себя концентрацию хлорофилла-а, коэффициент затухания солнечной радиации в морской воде на длине волны 490 нм и коэффициент поглощения света фитопланктоном на длине волны 443 нм. Выбросы в исходных данных предварительно отфильтровывались при предположении о логнормальном законе распределения перечисленных выше параметров. Выбросом считалось значение логарифма характеристики, отклоняющегося от своего среднесуточного значения на каждую конкретную дату более, чем на четыре стандартных отклонения. Для получения устойчивых статистик стандартное отклонение для каждой точки усреднялось в области  $80 \times 80$  км с центром в этой точке.

Восьмидневные ряды данных фотосинтетически активной солнечной радиации, доступные на сайте <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.production>, взяты с двух спутников SeaWiFS и MODIS. Предварительный анализ показал, что разница между данными по разным спутникам не превышает 3%, в связи с этим, при наличии данных обоих спутников, проводилось усреднение, в противном случае брались данные одного из спутников.

Массивы температуры поверхности моря (ТПО) взяты из базы Multiscale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature (MUR, 2011), предоставленной Jet Propulsion Laboratory Калифорнийского института технологий (California Institute of Technology, <http://mur.jpl.nasa.gov/InformationText.php>), где влияние облачности практически отсутствует за счет совместного использования инфракрасных и микроволновых спутниковых данных (AVHRR, MODIS и AMSR). В базе данных температуры скин-слоя приведены к температурам верхнего перемешанного слоя за счет использования поверхностных наблюдений с судов и океанических буев. В массиве приводятся ежесуточные данные с пространственным разрешением  $1 \times 1$  км. Для соответствия данным по цветности океана они были проинтерполированы в пространственную сетку  $4 \times 4$  км и усреднены за каждые 8 дней.

### *Натурные in-situ данные*

Первичная продукция, полученная по спутниковым данным, сравнивалась с наблюдениями in-situ. In-situ данные первичной продукции взяты из литературных источников (Teira, 2005; Tilstone, 2009; Figueiras, 2014). Наблюдения проводились в различные сезоны в период с 1992 по 2005 гг. и охватывают практически все биологические провинции СВАО. Для сравнения рассчитанные по трем моделям восьмидневные массивы первичной продукции были усреднены по соответствующим областям и временным промежуткам.

## Результаты

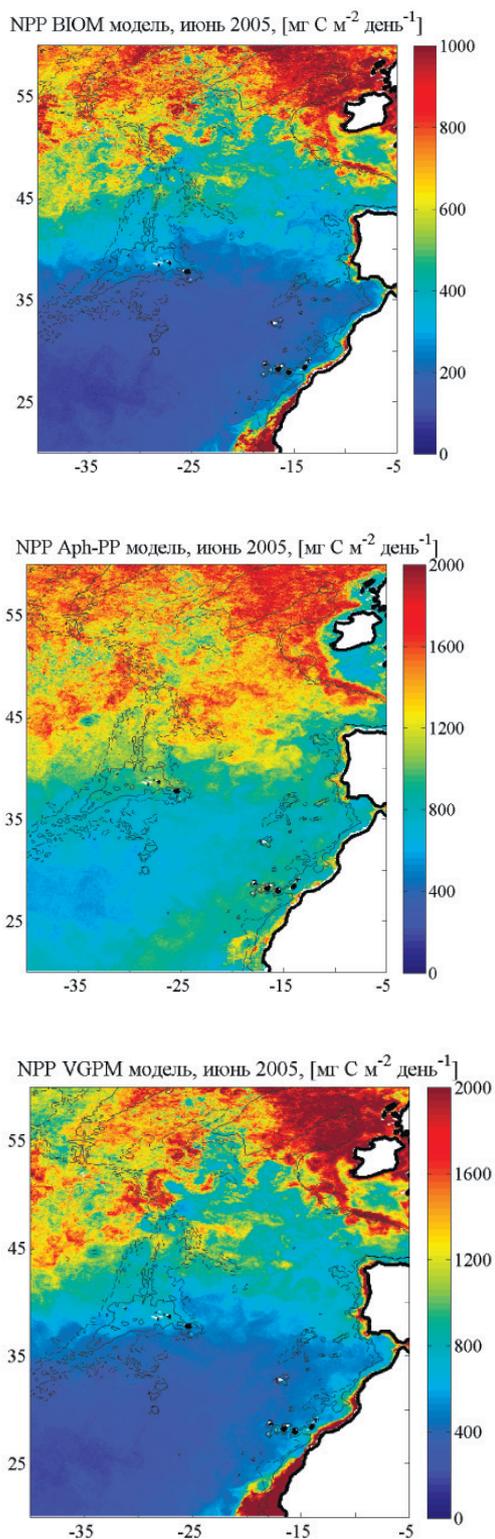


Рис. 1. Среднемесячное пространственное распределение первичной продукции, рассчитанной по трем моделям: BIOM, Aph-PP и VGPM для июня 2005 г.

На рис. 1 приведен пример среднемесячных распределений первичной продукции в июне 2005 г.

Пространственное распределение первичной продукции, рассчитанной по трем моделям, имеет общие структуры, выделяемые по всей акватории рассматриваемого региона. Это, в первую очередь, повышенные значения в зонах апвеллинга (апвеллинг возле Португалии – 36–44° с.ш., 9–11° з.д. (Nascimento, 2012), апвеллинг в районе Канарских островов – 22–27° с.ш., 14–18° з.д. и 30–34° с.ш., 8–12° з.д. (Pelegrí, 2005)) и в более северных широтах, в области Северо-Атлантического течения, а также вдоль материкового склона возле Великобритании. Зона относительного минимума располагается южнее Великобритании.

Все три модели показывают схожую пространственную изменчивость первичной продукции, хотя абсолютные значения первичной продукции часто существенно разнятся.

Для тестирования качества расчета абсолютных значений первичной продукции каждой из моделей в СВАО проводилось численное сравнение модельных данных первичной продукции с in-situ данными.

На рис. 2 представлено сравнение сезонного хода первичной продукции в период с мая 2001 г. по апрель 2002 г. в пункте, расположенном на северо-западном шельфе Иберийского полуострова (координаты: 42° 07.8' с.ш., 9° 10.2' з.д.). Натурные данные взяты из (Figueiras, 2014) и представляют собой еженедельные измерения первичной продукции в течение этого периода. Для сравнения данные были усреднены по месяцам.

Наибольшую корреляцию сезонная изменчивость натуральных наблюдений имеет с данными, полученными по модели Aph-PP. Коэффициент корреляции равен 0,8 ( $p < 0,01$ ). Модель BIOM

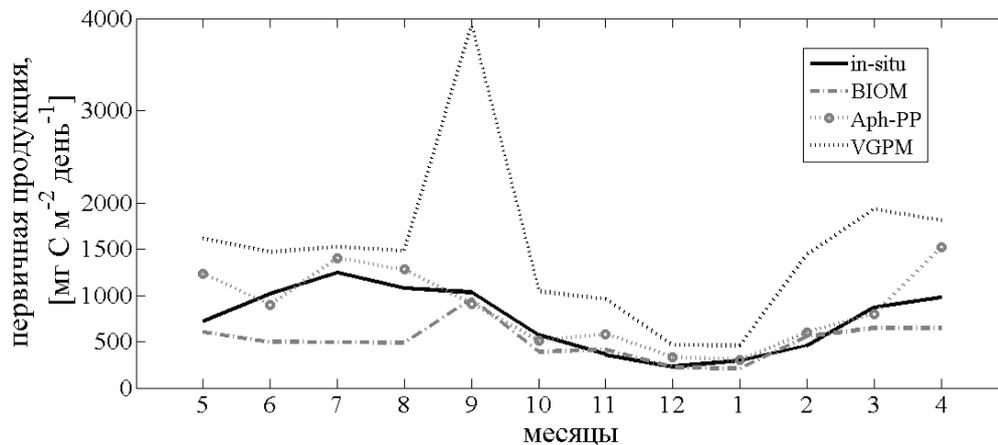


Рис. 2. Сравнение среднемесячных модельных данных первичной продукции с *in-situ* данными в пункте (42°07.8' с.ш., 9°10.2' з.д.) на шельфе Иберийского полуострова с мая 2001 г. по апрель 2002 г.

также неплохо соответствует *in-situ* данным, особенно в осенне-зимний период, тогда как в весенний и летний периоды она занижает значения первичной продукции. Модель VGPM, напротив, завышает значения в какие-то месяцы даже более, чем в два раза, хотя коэффициент корреляции, как и у модели BIOM, равен 0,6 ( $p < 0,05$ ).

Следующие два примера дают представление о характере связи между модельными и натурными данными в разных биологических провинциях северо-восточной Атлантики.

На рис. 3–4 приведено сравнение результатов модельного расчета первичной продукции с натурными данными, полученными в ходе научных экспедиций в 1998–2005 гг. в различные сезоны в нескольких провинциях СВАО (Tilstone, 2009): NADR – North Atlantic Drift – Северо-атлантический дрейф; NAST (E) – North Atlantic Subtropical Gyre (East) – Северо-атлантический круговорот (восточная часть); CNRY – Canary Current Coastal – Прибрежное Канарское течение; NATR – North Atlantic Tropical Gyre – Северо-атлантический тропический круговорот (Longhurst, 1995).

На графиках представлены значения первичной продукции в четырех провинциях, усредненные по времени за все экспедиции и по пространству в пределах каждой из провинций, и соответствующие им модельные результаты, а также указана разница между их абсолютными значениями, выраженная в процентах.

В биологических провинциях NADR и NAST(E) данные, полученные по модели BIOM, лучше всего соответствуют *in-situ* данным, хотя и несколько занижают значения первичной продукции. В провинции CNRY в зоне Канарского апвеллинга, модельные данные BIOM также близки к *in-situ*. И только в провинции NATR натурные измерения точнее описываются моделью VGPM. Завышенные значения модельных данных VGPM, особенно в провинции NADR, также отмечаются у (Tilstone, 2009). Они могут быть связаны с тем, что входящий в модель параметр оптимальной фиксации углерода хлорофиллом-а  $P_{opt}^B$  рассчитывается по температуре поверхности океана, а не экспериментальным путем из проб воды.

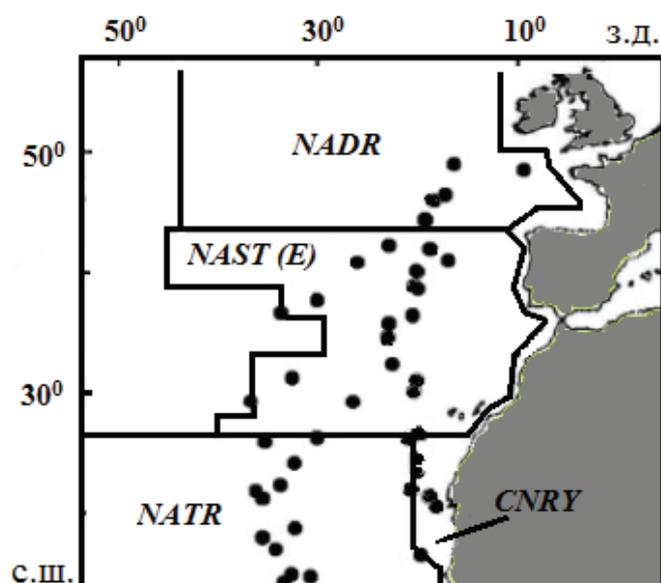


Рис. 3. Схема пунктов со значениями *in-situ* измерений первичной продукции в четырех провинциях СВАО по (Tilstone, 2009)

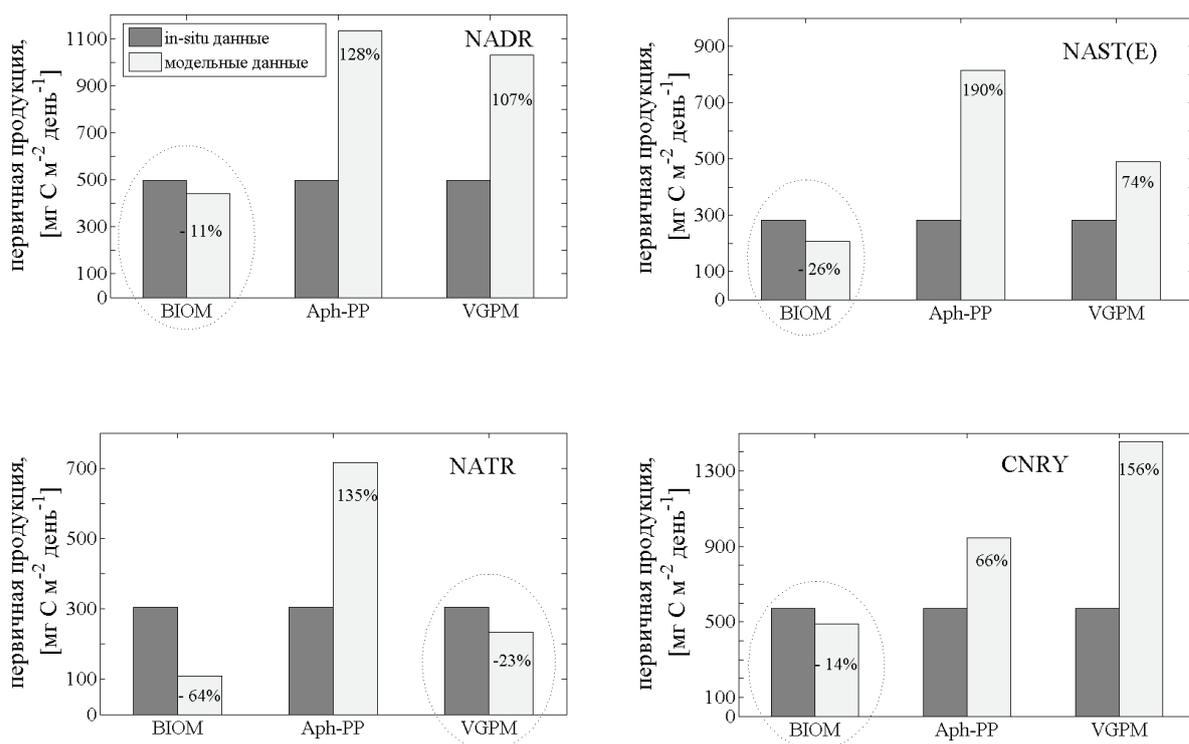


Рис. 4. Сравнение модельных данных первичной продукции с *in-situ* данными в различных провинциях СВАО

На рис. 5 приведено аналогичное сравнение натуральных и модельных данных первичной продукции. *In-situ* данные получены в ходе нескольких экспедиций в период с 1992 по 2001 гг. (Teira, 2005). Авторы статьи разделяют область всех экспедиций на 3 района (Temperate – Умеренный, Transition – Переходный, Subtropical - Субтропический) и усредняют

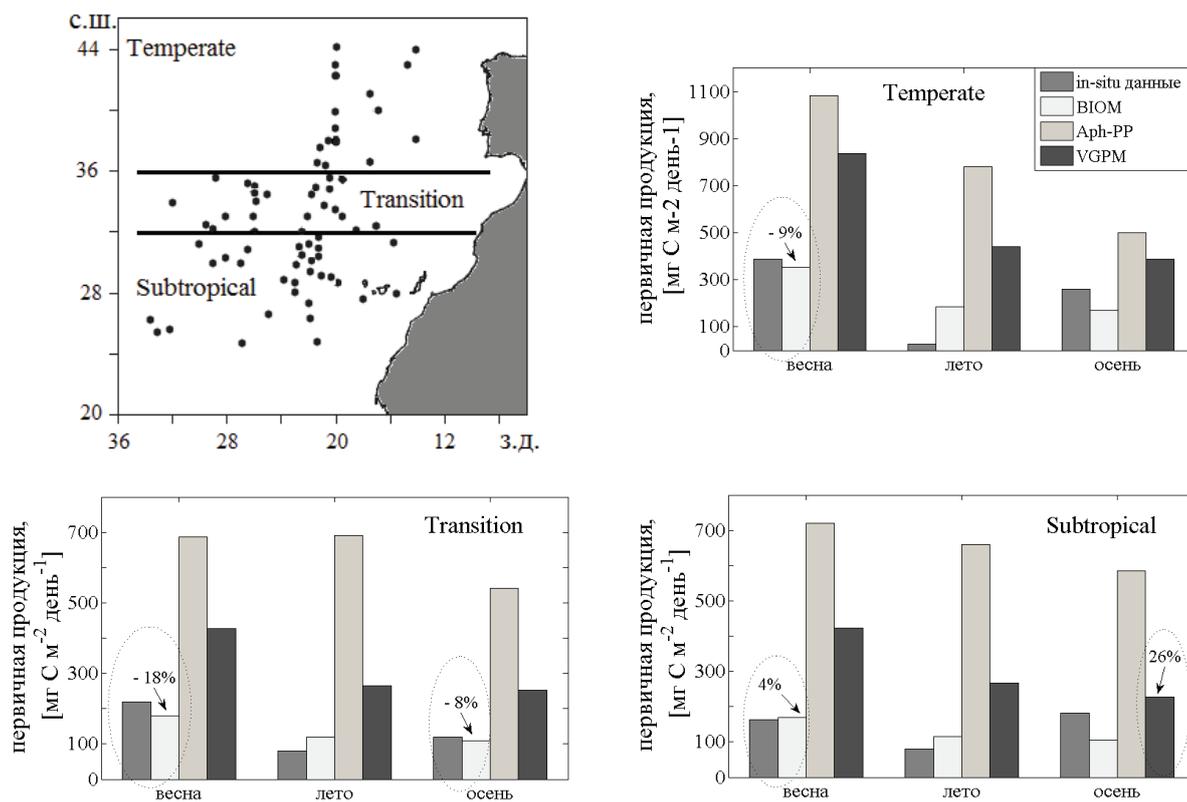


Рис. 5. Схема пунктов со значениями *in-situ* измерений первичной продукции по (Teira, 2005) (а) и сравнение с модельными данными в трех выделенных районах (б)

данные по сезонам в каждом из них. Сравнение проводилось по месяцам, соответствующим трем сезонам: весна (апрель 1999 и 2001 гг.), лето (июль – август 1998 г.), осень (октябрь 2000 г. и октябрь – ноябрь 2001 г.).

Лучше всего со значениями *in-situ* совпадают значения первичной продукции, рассчитанные с помощью модели BIOM, особенно в весенний и осенний сезоны. Исключение составляет субтропическая область в осенний период, где модель VGPM показывает лучшее соответствие. В летнее время модели BIOM и VGPM завышают значения первичной продукции по сравнению с натурными *in-situ* измерениями.

Модель Aph-PP как в этом, так и в предыдущем сравнении существенно завышает значения первичной продукции, несмотря на хорошую корреляцию в пункте на северо-западном шельфе Иберийского полуострова и в других частях Мирового океана (Lee, 1996; Kahru, 2014). Причина сильных различий в численных оценках осредненных по пространству и времени натурных измерений и модельных Aph-PP данных представляет интерес для дальнейших исследований. Но следует отметить, что сравнение результатов расчета первичной продукции по модели Aph-PP показало, что модельные данные, полученные с использованием применяемого авторами модели значения  $K_{\phi}$ , сильнее завышают значения первичной продукции, чем те, которые получены с использованием регионального значения  $K_{\phi}$ , предложенного в этом исследовании.

Схожесть численных значений модельных данных BIOM с *in situ* измерениями в данной работе связана с региональным подбором параметров, входящих в модель. Дальнейшее

исследование механизмов, определяющих соответствие данных, позволит выявить гидро-биологические причины, обуславливающие это соответствие.

## Заключение

Таким образом, сравнение модельных данных с натурными измерениями в СВАО показало, что использование в моделях BIOM и Aph-PP фотосинтетических параметров, определяемых экспериментально с учетом региональных особенностей и видового состава фитопланктонных организмов, способствовало приближению модельных результатов к натурным наблюдениям.

Из трех рассмотренных в данной работе моделей модель BIOM наиболее точно описывает характер изменчивости первичной продукции в СВАО в пространстве и по сезонам, несколько занижая значения первичной продукции. Значения, рассчитанные по модели VGPM, хуже всего соответствуют натурным наблюдениям, завышая значения первичной продукции практически во всех исследуемых областях СВАО (20°–51° с.ш., 10°–40° з.д), кроме субтропической области (20°–32° с.ш., 16°–40° з.д.).

Работа выполнена при поддержке грантов СПбГУ №18.55.1147.2014 и №18.38.142.2014.

Авторы благодарят MARE–Marine and Environmental Sciences Centre / Centre of Oceanography of the University of Lisbon за предоставленные материалы спутниковых и натуральных наблюдений, а также за возможность проведения исследований.

## Литература

1. Демидов А.Б., Мошаров С.А. Современные методы определения и оценки первичной продукции в морях и океанах// [http://www.ocean.ru/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=623&Itemid=78](http://www.ocean.ru/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=623&Itemid=78). 2013.
2. Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я. Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием данных спутникового сканера цвета Sea WiFS// Морской экологический журнал. 2009. № 1, Т. VIII. С. 81–106.
3. Babin M., Morel A., Hervé C., Bricaud A., Kolber Z., and Falkowski P.G. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems// Deep Sea Research I. 1996. Vol. 43 (8), pp. 1241–1272.
4. Behrenfeld M. J., and Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration// Limnology and Oceanography. 1997. Vol. 42(1), pp. 1–20.
5. Behrenfeld M. J., Boss E., Siegel D., Shea D.M. Carbon-based ocean production and phytoplankton physiology from space// Global Biogeochemical Cycles. 2005. Vol. 19, GB1006.
6. Dogliotti A.I., Lutz V.A., Segura V. Estimation of primary production in the southern Argentine continental shelf and shelf-break regions using field and remote sensing data// Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140, pp. 497–508.
7. Figueiras F.G., Espinoza-González O., Arbones B., Garrido J.L., Teixeira I.G., Castro C.G. Estimating phytoplankton size-fractionated primary production in the northwestern Iberian upwelling: Is mixotrophy relevant in pigmented nanoplankton?// Progress in Oceanography. 2014. in press (<http://dx.doi.org/10.1016/j.pocan.2014.08.011>).
8. 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.
9. Johnson Z. Regulation of marine photosynthetic efficiency by photosystem II. PhD dissertation: botany. 2000. p.189.
10. Kahru M., Jacox M.G., Lee Z., Kudela R.M., Manzano-Sarabia M., Mitchell B.G. Optimized multi-satellite merger of primary production estimates in the California Current using inherent optical properties// Journal of Marine Systems. 2014 (accepted manuscript).
11. Kiefer D. A. and Mitchell B. G. A simple, steady state description of phytoplankton growth based on absorption cross section and quantum efficiency// Limnology and Oceanography. 1983. Vol. 28, pp. 770–776.

12. *Kywalyanga M.N., Platt T., Sathyendranath S.* Ocean primary production calculated by spectral and broad-band models// *Marine ecology progress series*. 1992. Vol. 85, pp.171–185.
13. *Kywalyanga M.N., Platt T., Sathyendranath S., Lutz V.A. and Stuart V.* Seasonal variations in physiological parameters of phytoplankton across the North Atlantic// *Journal of Plankton Research*. 1998. Vol. 20 (1), pp. 17–42.
14. *Lee Z. P., Carder K. L., Marra J., Steward R. G., and Perry M. J.* Estimating primary production at depth from remote sensing// *Applied Optics*. 1996. Vol. 35, pp. 463–474.
15. *Longhurst A.* Seasonal cycles of pelagic production and consumption// *Progress in Oceanography*. 1995. Vol. 36, pp. 77–167.
16. *Marra J., Trees C. C., O'Reilly J. E.* Phytoplankton pigment absorption: A strong predictor of primary production in the surface ocean// *Deep Sea Research I*. 2007. Vol. 54(2), pp. 155–163.
17. *Mélin F., Hoepffner N.* Monitoring phytoplankton production from satellite: an aid to marine resources management// *Handbook of satellite remote sensing image interpretation: marine applications*. 2011. pp. 79–93.
18. *Morel A.* Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications// *Progress in Oceanography*. 1991. Vol. 26, pp. 263–306.
19. *Morel A., Antoine D., Babin M., Dandonneau Y.* Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EUMELI JGOFS program): the impact of natural variations in photosynthetic parameters on model predictive skill// *Deep Sea Research I*. 1996. Vol. 43(8), pp. 1273–1304.
20. *Morel A., Berthon J. F.* Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications// *Limnology and Oceanography*. 1989. Vol. 34, pp.1545–1562.
21. *Nascimento S, Franco P, Sousa F, Dias J., Neves F.* Automated computational delimitation of SST upwelling areas using fuzzy clustering// *Computers & Geosciences*. 2012. Vol. 43, pp. 207–2016.
22. *Pelegri J.L., Aristegui J., Cana L., González-Dávila M., Hernández-Guerra A., Hernández-León S., Marrero-Díaz A., Montero M.F., Sangrá P., Santana-Casiano M.* Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and offshore pumping of organic matter// *Journal of Marine Systems*. 2005. Vol. 54, pp. 3–37.
23. *Picart S.S., Sathyendranath S., Dowell M., Moore T., Platt T.* Remote sensing of assimilation number for marine phytoplankton// *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 146, pp. 87–96.
24. *Platt T., Sathyendranath S.* Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales// *Science*. 1988. Vol. 241, pp. 1613–1620.
25. *Platt T., Gallegos C. L., Harrison W. G.* Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton// *Journal of marine research*. 1980. Vol. 38, pp. 687–701.
26. *Smyth T. J., Tilstone G. H., Groom S. B.* Integration of radiative transfer into satellite models of ocean primary production// *Journal of geophysical research*. 2005. Vol. 110. C10014.
27. *Suggett D., Kraay G., Holligan P., Davey M., Jim Aiken J., Geider R.* Assessment of photosynthesis in a spring cyanobacterial bloom by use of a fast repetition rate fluorometer// *Limnology and Oceanography*. 2001. Vol. 46 (4) pp. 802–810.
28. *Teira E., Mourin B., Maran E., Pérez V., María J. Pazó, Pablo Serret, Demetrio de Armas, José Escáñez, E. Malcolm S. Woodward, Emilio Fernández.* Variability of chlorophyll and primary production in the Eastern North Atlantic Subtropical Gyre: potential factors affecting phytoplankton activity// *Deep-Sea Research I*. 2005. Vol. 52 pp. 569–588.
29. *Tilstone G., Miller P., Brewin R., Priede I.* Enhancement of primary production in the North Atlantic outside of the spring bloom, identified by remote sensing of ocean color and temperature// *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 146 pp.77–86.
30. *Tilstone G., Smyth T., Poulton A., Hutson R.* Measured and remotely sensed estimates of primary production in the Atlantic Ocean from 1998 to 2005// *Deep-Sea Research II*. 2009. Vol. 56 pp. 918–930.

## **Validation of satellite derived primary production models in the Northeast Atlantic**

**P.V. Lobanova<sup>1</sup>, I.L. Bashmachnikov<sup>2,1</sup>, V. Brotas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Saint-Peterburg State University, Institute of Earth Science, St. Petersburg 199034, Russia*  
*E-mail: pl19@mail.ru*

<sup>2</sup>*MARE – Marine and Environmental Sciences Centre / Centro de Oceanografia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal*  
*E-mail: igorb@fc.ul.pt*

With all the variety of models used for calculation of primary production from remote sensing data, a choice of the most realistic one remains a non-trivial issue. The use of regional biological parameters additionally increases the degree of correspondence between a model and in-situ observations. In this work, we estimate primary production in the Northeast Atlantic Ocean in 1998–2005 using three frequently used models: two models are based on the remotely measured chlorophyll-a concentration (VGPM and BIOM) and one on the remotely measured coefficient of light absorption by phytoplankton pigments (Aph-PP). The model results are further compared with in-situ observations of primary production in the area 20°–51° N and 10°–40° W. The primary production models use as the input level 3 Ocean Color data provided by the OC-CCI database (<http://www.esa-oceancolour-cci.org>). Photosynthetic model parameters are taken from experimental measure-

ments of phytoplankton photosynthetic efficiency under different light conditions obtained for Northeast Atlantic phytoplankton species.

The results show a close similarity in the patterns of primary production obtained by different models, although the absolute values in different models differ substantially. BIOM model is found to describe better the observed seasonal and spatial variability of the primary production in the Northeast Atlantic as compared to the two other models. However, in most of the cases BIOM slightly underestimates the production values. Use of regional photosynthetic parameters contributes to closer approximation of in-situ observations by the models.

**Key words:** models of primary production, Northeast Atlantic, remote sensing, chlorophyll-a, absorption coefficient of phytoplankton pigments

## References

1. Demidov A.B., Mosharov S.A. [http://www.ocean.ru/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=623&Itemid=78](http://www.ocean.ru/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=623&Itemid=78).
2. Finenko Z.Z., Suslin V.V., Churilova T.Ya. Regional'naya model' dlya rascheta pervichnoi produktsii Chernogo morya s ispol'zovaniem dannykh sputnikovogo skanera tsveta Sea WiFS (The regional model to calculate the Black Sea primary production using satellite color scanner SeaWiFS), *Morskoj ekologicheskii zhurnal*, 2009, No. 1, Vol. 8, pp. 81–106.
3. Babin M., Morel A., Hervé C., Bricaud A., Kolber Z., and Falkowski P.G. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems, *Deep Sea Research I*, 1996, Vol. 43(8), pp. 1241–1272.
4. Behrenfeld M. J., and Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 1997, Vol. 42(1), pp. 1–20.
5. Behrenfeld M. J., Boss E., Siegel D., Shea D.M. Carbon-based ocean production and phytoplankton physiology from space, *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, Vol. 19, GB1006.
6. Dogliotti A.I., Lutz V.A., Segura V. Estimation of primary production in the southern Argentine continental shelf and shelf-break regions using field and remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 140, pp. 497–508.
7. Figueiras F.G., Espinoza-González O., Arbones B., Garrido J.L., Teixeira I.G., Castro C.G. Estimating phytoplankton size-fractionated primary production in the northwestern Iberian upwelling: Is mixotrophy relevant in pigmented nanoplankton, *Progress in Oceanography*, 2014, in press (available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.011>)
8. 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.
9. Johnson Z. *Regulation of marine photosynthetic efficiency by photosystem II. PhD dissertation: botany*, 2000, p. 189.
10. Kahru M., Jacox M.G., Lee Z., Kudela R.M., Manzano-Sarabia M., Mitchell B.G. Optimized multi-satellite merger of primary production estimates in the California Current using inherent optical properties, *Journal of Marine Systems*, 2014 (accepted manuscript).
11. Kiefer D. A. and Mitchell B. G. A simple, steady state description of phytoplankton growth based on absorption cross section and quantum efficiency, *Limnology and Oceanography*, 1983, Vol. 28, pp. 770–776.
12. Kyewalyanga M.N., Platt T., Sathyendranath S. Ocean primary production calculated by spectral and broad-band models, *Marine ecology progress series*, 1992, Vol. 85, pp.171–185.
13. Kyewalyanga M.N., Platt T., Sathyendranath S., Lutz V.A. and Stuart V. Seasonal variations in physiological parameters of phytoplankton across the North Atlantic, *Journal of Plankton Research*, 1998, Vol. 20 (1), pp. 17–42.
14. Lee Z. P., Carder K. L., Marra J., Steward R. G., and Perry M. J. Estimating primary production at depth from remote sensing, *Applied Optics*, 1996, Vol. 35, pp. 463–474.
15. Longhurst A. Seasonal cycles of pelagic production and consumption, *Progress in Oceanography*, 1995, Vol. 36, pp. 77–167.
16. Marra J., Trees C. C., O'Reilly J. E. Phytoplankton pigment absorption: A strong predictor of primary production in the surface ocean, *Deep Sea Research I*, 2007, Vol. 54(2), pp. 155–163.
17. Mélin F., Hoepffner N. Monitoring phytoplankton production from satellite: an aid to marine resources management, *Handbook of satellite remote sensing image interpretation: marine applications*, 2011, pp. 79–93.
18. Morel A. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications, *Progress in Oceanography*, 1991, Vol. 26, pp. 263–306.
19. Morel A., Antoine D., Babin M., Dandonneau Y. Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EUMELI JGOFS program): the impact of natural variations in photosynthetic parameters on model predictive skill, *Deep Sea Research I*, 1996, Vol. 43(8), pp. 1273–1304.
20. Morel A., Berthon J. F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications, *Limnology and Oceanography*, 1989, Vol. 34, pp.1545–1562.
21. Nascimento S, Franco P, Sousa F, Dias J, Neves F. Automated computational delimitation of SST upwelling areas using fuzzy clustering, *Computers & Geosciences*, 2012, Vol. 43, pp. 207–2016.
22. Pelegrí J.L., Arístegui J., Cana L., González-Dávila M., Hernández-Guerra A., Hernández-León S., Marrero-Díaz A., Montero M.F., Sangrá P., Santana-Casiano M. Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and offshore pumping of organic matter, *Journal of Marine Systems*, 2005, Vol. 54, pp. 3–37.
23. Picart S.S., Sathyendranath S., Dowell M., Moore T., Platt T. Remote sensing of assimilation number for marine phytoplankton, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 146, pp. 87–96.

24. Platt T., Sathyendranath S. Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales, *Science*, 1988, Vol. 241, pp. 1613–1620.
25. Platt T., Gallegos C. L., Harrison W. G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton, *Journal of marine research*, 1980, Vol. 38, pp. 687–701.
26. Smyth T. J., Tilstone G. H., Groom S. B. Integration of radiative transfer into satellite models of ocean primary production, *Journal of geophysical research*, 2005, Vol. 110, C10014.
27. Suggett D., Kraay G., Holligan P., Davey M., Jim Aiken J., Geider R. Assessment of photosynthesis in a spring cyanobacterial bloom by use of a fast repetition rate fluorometer, *Limnology and Oceanography*, 2001, Vol. 46 (4), pp. 802–810.
28. Teira E., Mourin B., Maran E., Pérez V., María J. Pazó, Pablo Serret, Demetrio de Armas, José Escáñez, E. Malcolm S. Woodward, Emilio Fernández. Variability of chlorophyll and primary production in the Eastern North Atlantic Subtropical Gyre: potential factors affecting phytoplankton activity, *Deep-Sea Research I*, 2005, Vol. 52, pp. 569–588.
29. Tilstone G., Miller P., Brewin R., Priede I. Enhancement of primary production in the North Atlantic outside of the spring bloom, identified by remote sensing of ocean color and temperature, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 146, pp.77–86.
30. Tilstone G., Smyth T., Poulton A., Hutson R. Measured and remotely sensed estimates of primary production in the Atlantic Ocean from 1998 to 2005, *Deep-Sea Research II*, 2009, Vol. 56, pp. 918–930.