

Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета

Т.В. Буканова ¹, С.В. Вазюля ², О.В. Копелевич ², В.И. Буренков ²,
А.В. Григорьев ², А.Н. Храпко ², С.В. Шеберстов ², С.В. Александров ³

¹Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
236000 Калининград, проспект Мира, 1

E-mails: felice04@rambler.ru ;

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН),
117851 Москва, Нахимовский проспект, 36

E-mail: oleg@ocean.ru ;

³Атлантический научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии,
236000 Калининград, ул. Д. Донского, 5

E-mail: hydrobio@mail.ru

Выполненная по данным судовых измерений верификация спутниковых алгоритмов расчета концентраций хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике показала, что существующие алгоритмы не обеспечивают приемлемой точности расчета биооптических параметров в этом регионе. С целью разработки региональных алгоритмов проведены валидационные натурные измерения в сочетании со спутниковыми наблюдениями. На основе выполненной коррекции предложены модифицированные биооптические алгоритмы для расчета концентрации хлорофилла и взвеси по данным сканеров MODIS и MERIS, обеспечивающие наилучшее совпадение рассчитанных и измеренных значений данных параметров.

Ключевые слова: юго-восточная Балтика, спутниковые сканеры цвета, региональные алгоритмы, концентрация хлорофилла и взвеси, верификация, натурные измерения.

1. Введение

Для оценки экологического состояния и биологической продуктивности вод используются данные по первичной продукции фитопланктона, концентрации хлорофилла и взвеси. Эти параметры в поверхностном слое можно рассчитать по данным спутниковых сканеров цвета (Копелевич и др., 2006).

Однако в водах Балтийского моря стандартные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла по данным спутниковых сканеров цвета SeaWiFS и MODIS дают значительно завышенные значения (Woźniak et al, 2008; Darecki et al., 2008). Относительные ошибки составляют: систематические – 177% для SeaWiFS и 236% для MODIS; случайные – 159% для SeaWiFS и 209% для MODIS. Концентрация хлорофилла изменялась в диапазоне от 0.3 до 100 мг/м³.

Главная причина больших ошибок стандартных алгоритмов для Балтийского моря – высокая концентрация окрашенного органического вещества, что является специфической особенностью балтийских вод (Darecki, Stramski, 2004). В связи с этим, требуется специальная верификация используемых алгоритмов обработки спутниковых данных по данным натурных измерений в исследуемом районе.

Цель проводимых исследований – разработка региональных алгоритмов расчета по спутниковым данным концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной части Балтийского моря. Для расчетов использовались данные спутниковых сканеров цвета SeaWiFS, MODIS-Terra, MODIS-Aqua и MERIS.

Исследования включали, во-первых, верификацию существующих спутниковых алгоритмов по данным судовых измерений концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной части Балтийского моря в 2003-2009 гг. (раздел 3); эти данные позволили оценить результирующие ошибки спутниковых алгоритмов, обусловленные ошибками как атмосферной коррекции, так и биооптических алгоритмов. Более полные исследования, выполненные в 2010 г., включали натурные измерения спектральных коэффициентов яркости излучения, вышедшего из-под поверхности моря, и благодаря этому позволили оценить в отдельности ошибки атмосферной коррекции (раздел 4.1) и биооптических алгоритмов (раздел 4.2).

2. Данные натурных измерений и аппаратура

В период 2003-2009 гг. в рамках комплексного экологического мониторинга по программе ООО «ЛУКОЙЛ – Калининградморнефть» сотрудниками Атлантического отделения ИО РАН проведены 26 экспедиций НИС «Профессор Штокман». Район мониторинга охватывал юго-восточную часть российской экономической зоны Балтийского моря. Измерения концентрации хлорофилла «а» и взвеси выполнены на 428 станциях. Определение концентрации хлорофилла проводилось спектрофотометрическим методом (Методика, 1990).

В апреле, июне, июле и октябре 2010 г. в юго-восточной части Балтийского моря проведены четыре экспедиции, цель которых заключалась в сборе данных для последующей верификации алгоритмов атмосферной коррекции данных разных сканеров цвета и разработки региональных алгоритмов расчета концентрации хлорофилла и взвеси. На 28 станциях выполнены натурные измерения спектральных коэффициентов яркости излучения, вышедшего из-под поверхности моря, а также сбор и анализ проб воды для оценки содержания хлорофилла «а» и взвеси в поверхностном горизонте по стандартным методикам (Методика, 1990).

Для измерений спектральных коэффициентов яркости излучения, вышедшего из-под поверхности моря, использовался плавающий спектрорадиометр, разработанный в Лаборатории оптики океана ИОРАН (Артемов и др., 2000). Спектральный диапазон - 390-700 нм; спектральное разрешение - 2.5 нм; точность измерений - 5%. Для предотвращения влияния корпуса судна измерения проводились на расстоянии порядка 30-50 м от борта. Измеряемые значения спектральной яркости излучения позволяют оценить ошибки атмосферной коррекции спутниковых данных, а также являются исходными для расчета биооптических параметров воды. Анализировались спутниковые данные четырех сканеров цвета: MERIS, MODIS Aqua, MODIS Terra, SeaWiFS. При безоблачных условиях измерения выполнены на 19 подспутниковых станциях.

3. Верификация спутниковых алгоритмов по данным измерений 2003-2009 гг.

Данные натурных измерений концентрации хлорофилла и взвеси в сопоставлении со спутниковыми данными позволили оценить ошибки применения различных спутниковых алгоритмов расчета биооптических параметров для исследуемого района.

Для концентрации хлорофилла удовлетворительная корреляция между натурными измерениями и спутниковыми данными обнаружена для сканера MERIS (алгоритм Algal Pigment Index II - метод нейронных сетей): квадрат коэффициента корреляции $r^2 = 0.59$, ошибка регрессии $S_{reg} = 2.9$ мг/м³ (объем выборки $N = 87$). Спутниковые данные давали небольшое систематическое завышение, по сравнению с данным *in situ*. Устранить эту ошибку можно посредством уравнения регрессии между спутниковыми значениями Chl_MERIS и натурными данными измерений:

$$Chl_MERIS_corr = 0.60 * Chl_MERIS + 0.93. \quad (1)$$

Результаты такой коррекции ($S_{reg} = 1.7$ мг/м³) представлены на рис. 1а.

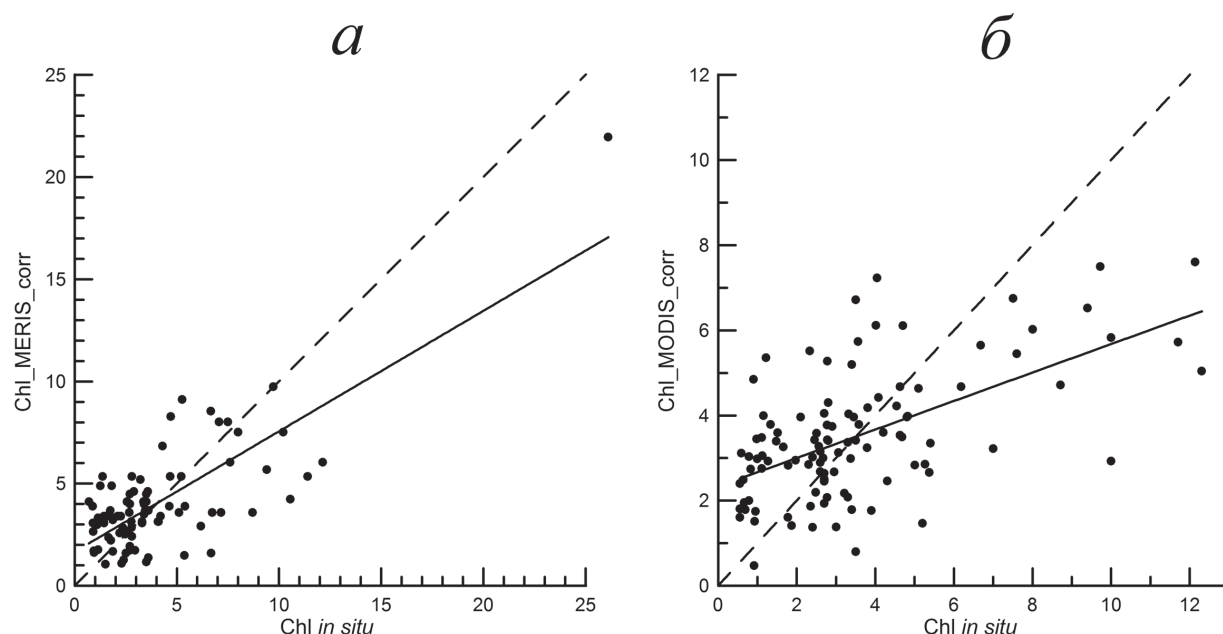


Рис. 1. Сопоставление данных по концентрации хлорофилла, полученных по данным натурных и спутниковых измерений: а – по данным MERIS (корректированным по уравнению (1)); б – по данным MODIS (польский алгоритм с коррекцией по уравнению (4)). Сплошные линии – линейная корреляция между полученными данными, пунктир – линия идеального соотношения 1:1

Регрессионный алгоритм (Algal Pigment Index I) обработки данных MERIS давал неудовлетворительные результаты и поэтому не использовался.

Также плохие результаты давал стандартный (регрессионный) алгоритм обработки данных MODIS: $r^2 = 0.08$, $S_{reg} = 5.3$ мг/м³ ($N = 91$). В первую очередь, это связано с тем, что этот алгоритм выведен для вод первого типа, а воды Балтики относятся ко второму типу вод с высокой концентрацией окрашенного органического вещества (Darecki, Stramski, 2004). Для вод второго типа необходимы региональные алгоритмы. В работах (Woźniak et al., 2008; Darecki et al., 2008) представлен целый комплекс региональных алгоритмов обработки спутниковых данных, разработанных специалистами Института океанологии Польской Академии Наук (ИО ПАН) для южной части Балтийского моря, в том числе алгоритм для расчета концентрации хлорофилла по данным MODIS:

$$Chl_pol_MODIS = 10^{(1.102 - 0.8708XR - 0.3449XR \cdot XR)}, \quad (2)$$

$$XR = [Rrs(490) - Rrs(665)] / [Rrs(550) - Rrs(665)]. \quad (3)$$

Относительные ошибки предложенного регионального алгоритма составили: систематическая – 9.9%, случайная ~57%.

При использовании данного алгоритма для вод исследуемого района наблюдается значимая корреляция между данными спутниковых и натурных измерений: $r^2 = 0.33$, $S_{reg} = 1.9$ мг/м³ (N = 109). Однако спутниковые данные дают в среднем завышенные значения концентрации хлорофилла. Как и ранее, это завышение исправляется с помощью корректирующего уравнения регрессии:

$$Chl_MODIS_corr = 0.64 * Chl_pol_MODIS + 0.42. \quad (4)$$

Результаты коррекции ($S_{reg} = 1.2$ мг/м³) показаны на рис.1б.

Метод нейронных сетей для расчета концентрации взвеси по данным сканера MERIS дает для юго-восточной части Балтийского моря неудовлетворительные результаты. Коррекция на систематическую ошибку выполняется с помощью уравнения регрессии:

$$TSM_MERIS_corr = 0.40 * TSM_MERIS + 0.68. \quad (5)$$

Результат сопоставления рассчитанных и измеренных данных по концентрации взвеси показан на рисунке 2 – виден большой разброс точек и, соответственно низкая корреляция $-r^2 = 0.16$, $S_{reg} = 0.34$ мг/л (N = 86).

Несколько лучшие результаты получаются по данным MODIS. Вначале рассчитывается показатель обратного рассеяния взвесью bbr. (Буренков и др., 2001), значения которого неплохо коррелируют с данными по концентрации взвеси. Концентрация взвеси определяется через уравнение регрессии, выведенное на основе данных натурных измерений:

$$TSM = 83.3 b_{bp} + 0.04. \quad (6)$$

Однако и здесь разброс точек довольно велик (рис. 3) $-r^2 = 0.37$, $S_{reg} = 0.78$ мг/л (N = 101).

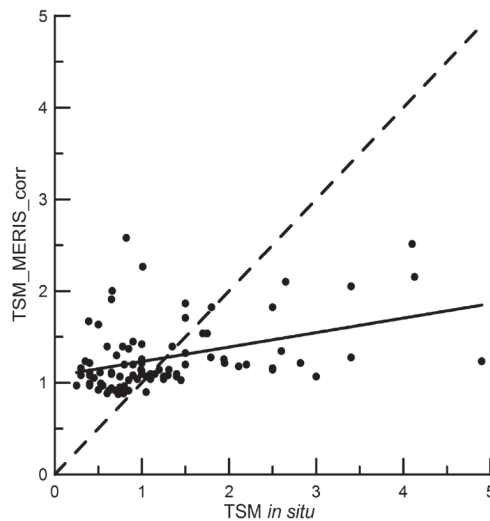


Рис. 2. Сопоставление данных по концентрации взвеси, полученных в результате натурных и спутниковых измерений по данным MERIS (корректированные по уравнению (5)). Сплошная линии – линейная корреляция между полученными данными, пунктир – линия идеального соотношения 1:1

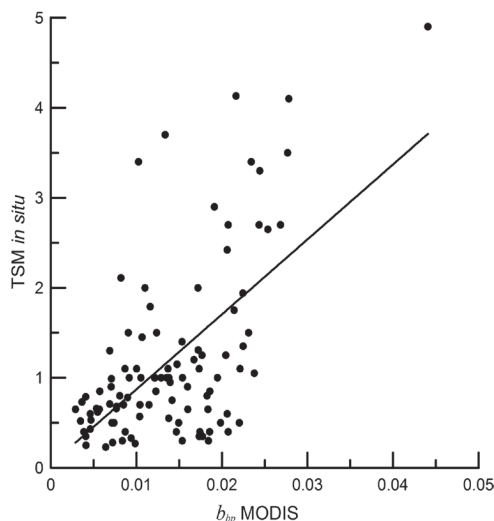


Рис. 3. Разброс точек относительно линии регрессии между измеренными величинами концентрации взвеси TSM и рассчитанными значениями показателя обратного рассеяния взвесью b_{bp} по данным MODIS

4. Результаты натурных исследований 2010 г.

4.1. Оценка ошибок атмосферной коррекции

Сравнение результатов атмосферной коррекции для четырёх сканеров цвета с данными натурных измерений спектральных коэффициентов яркости излучения, вышедшего из-под поверхности моря, в 2010 г. показало, что почти во всех случаях большие ошибки наблюдаются для каналов 412 и 443 нм. Результаты выполненных расчетов среднеквадратичных ошибок атмосферной коррекции показали, что приемлемые ошибки получаются только для каналов с длиной волны $\lambda > 600$ нм.

Средние спектры коэффициента яркости излучения, выходящего из водной толщи, рассчитанные по данным измерений *in situ* и по спутниковым данным сканеров цвета MERIS и MODIS Aqua, показали, что для каналов с длиной волны $\lambda < 600$ нм, по спутниковым данным получают завышенные значения коэффициента яркости, что указывает на наличие систематической ошибки атмосферной коррекции (рис. 4).

4.2 Оценка ошибок биооптических алгоритмов

Ошибки стандартных и польского регионального алгоритмов расчета концентрации хлорофилла

Данные натурных измерений $\rho(\lambda)$ – коэффициента яркости излучения, выходящего из водной толщи, выполненные плавающим спектрорадиометром в 2010 г., были использованы для расчета величины концентрации хлорофилла по двум стандартным алгоритмам, применяемым к спутниковым данным: OC4v4 (SeaWiFS) и OC3M (MODIS), а так же по региональному алгоритму, разработанному специалистами ИО ПАН для южной части Балтийского моря (Woźniak et al, 2008; Darecki et al., 2008).

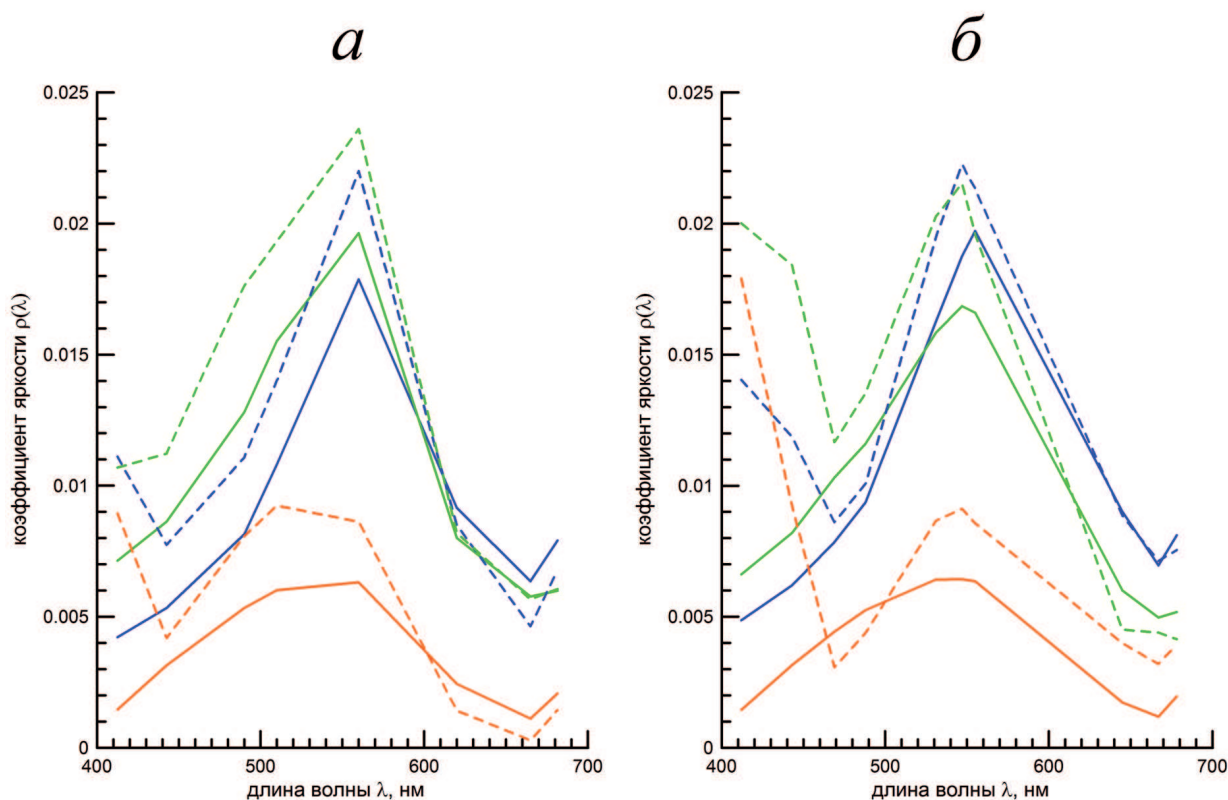


Рис. 4. Сопоставление средних спектров коэффициента яркости излучения, выходящего из водной толщи, по данным судовых измерений (сплошные линии) и по данным сканеров цвета (пунктир) на подспутниковых станциях за разные периоды 2010 г.: а - MERIS, б - MODIS. В июне - синие линии, в июле - зеленые, в октябре - оранжевые.

Результаты сравнения данных о концентрации хлорофилла, полученных в результате натуральных измерений и рассчитанных стандартным алгоритмом OC4v4 (SeaWiFS) по измеренным величинам $\rho(\lambda)$ показали, что для всех станций 2010 г. ($N = 20$) корреляция между этими величинами практически отсутствует ($r^2 = 0.001$). Особенно велики ошибки для двух прибрежных станций, проведенных в апреле 2010 г. Но даже если исключить эти станции из рассмотрения, корреляция по-прежнему остаётся плохой ($r^2 = 0.19$, $N = 18$), что свидетельствует о непригодности стандартного алгоритма OC4v4 (SeaWiFS) для юго-восточной части Балтийского моря.

Аналогичные результаты получаются и для алгоритма OC3M (MODIS), где по данным для всех станций 2010 г. ($N = 20$) корреляция практически отсутствует ($r^2 = 0.0008$). Даже при исключении прибрежных станции корреляция остаётся плохой ($r^2 = 0.16$, $N = 18$), что говорит о непригодности стандартного алгоритма OC3M (MODIS) для юго-восточной части Балтийского моря.

Для регионального польского алгоритма, разработанного специалистами ИО ПАН для южной части Балтийского моря, получаются гораздо лучшие результаты. Правда, по данным для всех станций 2010 г. ($N = 20$) корреляция также оказывается плохой ($r^2 = 0.12$, $S_{reg} = 4.5 \text{ мг/м}^3$), но при исключении прибрежных станций она значительно улучшается ($r^2 = 0.50$, $N = 18$, $S_{reg} = 3.6 \text{ мг/м}^3$).

Измеренные спектры коэффициента яркости моря $\rho(\lambda)$ аппроксимировались с помощью полуаналитического биооптического алгоритма, предназначенного для определения концентрации хлорофилла, поглощения желтым веществом и обратного рассеяния взвесью по данным о коэффициенте яркости. Расчеты проводились аналогично работе Копелевич и др. (2008), но без учета отражения ото дна.

Благодаря использованию малопараметрической модели, решение обратной задачи сводится к определению трех неизвестных параметров: концентрации хлорофилла Chl , показателя поглощения желтым веществом a_g и показателя обратного рассеяния частицами b_{br} . Нелинейная задача минимизации квадратичной невязки для определения этих параметров через значения коэффициента яркости восходящего излучения $\rho(\lambda)$ для спектральных каналов MODIS решалась с помощью программы MATLAB. При этом ставилось условие положительности всех искомым параметров. Для решения обратной задачи лучше всего использовать все 8 каналов сканера цвета MODIS в видимом диапазоне спектра: 412, 443, 488, 531, 547, 555, 645, 667 нм. Зная о больших ошибках атмосферной коррекции на длинах волн 412, 443, 488, мы пытались в обратной задаче моделирования спектра ограничиться 6 каналами: 488, 531, 547, 555, 645, 667 нм; и 5: 531, 547, 555, 645, 667 нм.

Восстановленные с помощью описанного выше алгоритма значения биооптических параметров сравнивались с измеренными. Результаты сопоставления измеренных и восстановленных концентраций хлорофилла (табл. 1) показали, что не для всех станций удается восстановить концентрацию хлорофилла, это связано в первую очередь с малым вкладом поглощения пигментами в суммарное поглощение морской водой. Наибольшие ошибки получаются для прибрежных апрельских станций. Если их исключить при расчете корреляции, то ошибки регрессии значительно уменьшаются, но всё-таки остаются довольно большими. Сравнение измеренных и модельных значений показало, что для лучшего восстановления параметров необходимо использовать все 8 каналов видимого диапазона (или хотя бы 6), а для 5 каналов получаются большие ошибки.

Таблица 1. Результаты линейной корреляции между концентрациями хлорофилла, полученных в результате натурных измерений и рассчитанных с помощью полуаналитического алгоритма по измеренным величинам коэффициента яркости моря для каналов MODIS

Количество каналов для моделирования	По какому массиву станций считалась корреляция	Число пар измерений	Квадрат коэффициента корреляции	Ошибка регрессии, мг/м ³
8	Все станции	20	0.69	10.8
8	Исключая станцию 1 (апрель)	19	0.55	5.9
6	Все станции	20	0.69	10.1
6	Исключая станцию 1 (апрель)	19	0.51	6.3
5	Все станции	20	0.68	21.7
5	Исключая станции 1, 5 (апрель)	18	0.05	9.4

Оказалось, что измеренные величины концентрации хлорофилла хорошо коррелируют с величинами показателя поглощения РОВ, рассчитанными полуаналитическим алгоритмом (табл. 2). Это можно объяснить корреляцией между содержанием хлорофилла и окрашенного РОВ в рассматриваемом районе. Если исключить прибрежные апрельские станции, ошибка регрессии составляет 3.3, 3.9 и 4.2 мг/м³ по 8, 6 и 5 каналам, соответственно.

Таблица 2. Результаты линейной корреляции между величинами концентрациями хлорофилла, полученными в результате натуральных измерений и показателя поглощения РОВ, рассчитанных биооптическим алгоритмом, по измеренным величинам коэффициента яркости моря для каналов MODIS

Количество каналов для моделирования	По какому массиву станций считалась корреляция	Число пар измерений	Квадрат коэффициента корреляции	Ошибка регрессии, мг/м ³
8	Все станции	20	0.65	6.0
8	Исключая станции 1, 5 (апрель)	18	0.64	3.3
6	Все станции	20	0.55	6.8
6	Исключая станции 1, 5 (апрель)	18	0.47	3.9
5	Все станции	20	0.22	9.0
5	Исключая станции 1, 5 (апрель)	18	0.40	4.2

Сопоставление измеренных значений концентрации хлорофилла и модельных значений показателя поглощения РОВ еще раз показало необходимость улучшения атмосферной коррекции, так как при использовании большего числа каналов ошибки регрессии заметно уменьшаются.

Сравнение значений концентрации взвеси, измеренных *in situ*, и показателя обратного рассеяния взвеси, рассчитанного посредством полуаналитического алгоритма по измеренным величинам коэффициента яркости моря для каналов MODIS, показало их слабую корреляцию, что может быть связано с качественным изменением взвеси в зависимости от сезона и места измерения.

5. Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- Результаты верификации спутниковых алгоритмов по данным судовых измерений концентрации хлорофилла и взвеси в 2003-2009 гг. и подспутниковых измерений 2010 г. показали, что существующие алгоритмы не обеспечивают приемлемой точности расчета биооптических параметров воды в юго-восточной части Балтийского моря.

- Для оценки концентрации хлорофилла наилучшие результаты получаются при использовании регионального алгоритма для сканера MODIS, разработанного специалистом ИОПАН, и алгоритма Algal Pigment Index II (метод нейронных сетей) для сканера MERIS; в обоих случаях рекомендуется корректировать систематическую ошибку с по-

мощью уравнений регрессии (4) и (1). Ошибка регрессии для MODIS равна 1.2 мг м^{-3} , для MERIS – 1.7 мг м^{-3} .

- Для оценки концентрации взвеси рекомендуется использовать алгоритм расчета TSM через показатель рассеяния назад взвеси b_{br} по данным сканера MODIS. Ошибка регрессии составляет 0.78 мг/л .

- Данные подспутниковых измерений 2010 г. показали, что большая часть ошибок расчета связана с плохой атмосферной коррекцией. По-видимому, потребуются региональные алгоритмы атмосферной коррекции (Копелевич и др., 2009).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-90718-моб_ст).

Литература

1. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И. и др. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его методология // *Океанология*. 2000. Т. 40. №1. С.148-155.
2. Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В. и др. Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // *Океанология*. 2001. Т. 41, № 5. С.653-659.
3. Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Вып. 3. Т. II. С.99–105.
4. Копелевич О.В., В.И. Буренков, С.В. Вазюля и др. Учет отражения солнечного излучения от дна на мелководье при обработке данных спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Вып.5. Т. II. С.117-127.
5. Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В. Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Вып.6. Т. I. С.400-408.
6. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла “а”. ГОСТ 17.1.04.02-90. М: Издательство стандартов, 1990. 15 с.
7. Darecki et al. Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: Empirical validation // *OCEANOLOGIA*. 2008. 50(4). P.509-538.
8. Darecki M., Stramski D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // *Remote Sensing of Environment*. 2004. 89. P.326–350.
9. Woźniak et al. Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: Mathematical apparatus // *OCEANOLOGIA*. 2008. 50(4). P.451-508.

Regional algorithms for estimation of chlorophyll and suspended matter concentrations in the South-Eastern Baltic by ocean color sensors

T. Bukanova ¹, S.Vazyulya ², O. Kopelevich ², V. Burenkov ²,
A. Grigoriev ², A. Khrapko ², S. Sheberstov ², S. Aleksandrov ³

¹*Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS,
236000 Kaliningrad, 1 prospect Mira
E-mail: felice04@rambler.ru;*

²*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS,
117851 Moscow, 36 Nakhimovskiy prospect
E-mail: oleg@ocean.ru ;*

³*Atlantic Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography,
236000 Kaliningrad, 5 D. Donskogo str.
E-mail: hydrobio@mail.ru*

Validation of the standard bio-optical algorithms by in situ data on the chlorophyll concentration (Chl) and total suspended matter concentration (TSM) measured in the South-Eastern Baltic has shown that the standard algorithms cannot provide the Chl and TSM values with a reasonable accuracy in that region. The extended in situ measurements of spectral radiometric measurements coupled with satellite observations were carried out for development of regional algorithms. The corrected bio-optical algorithms have been derived for the data of satellite scanners MODIS and MERIS which give Chl and TSM concentration with better accuracy.

Keywords: South-Eastern Baltic, ocean color sensors, regional algorithms, chlorophyll and suspended matter concentrations, verification, in situ measurements.