

Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета для вод юго-восточной Балтики

Т.В. Буканова¹, С.В. Вазюля², О.В. Копелевич², В.И. Буренков²,
С.В. Шеберстов², С.В. Александров³

¹ Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Шириова РАН
236000, Калининград, Мира пр., 1
E-mail: felice04@rambler.ru

² Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН (ИО РАН)
117851, Москва, Нахимовский пр., 36
E-mail: oleg@ocean.ru

³ Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
236000, Калининград, Д. Донского, 5
E-mail: hydrobio@mail.ru

Проведенные в 2010–2011 гг. исследования по разработке региональных алгоритмов расчета концентрации хлорофилла-*a* и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета показали, что значительная доля ошибок расчета указанных параметров связана с неудовлетворительной атмосферной коррекцией. В настоящей работе сделана попытка улучшить атмосферную коррекцию для рассматриваемого региона путем разработки региональных алгоритмов. На основе данных натурных измерений спектрального коэффициента яркости водной толщи плавающим спектрорадиометром реализован подход к решению задачи атмосферной коррекции, ранее разработанный в ИОРАН для других морей. Даны примеры применения разработанного алгоритма в сравнении с данными натурных измерений в юго-восточной Балтике и результатами, полученными при использовании стандартных спутниковых алгоритмов. Анализируется возможность совместного использования спутниковых данных сканеров MODIS и MERIS.

Ключевые слова: юго-восточная Балтика, спутниковые сканеры цвета MODIS и MERIS, региональные алгоритмы, атмосферная коррекция, базисные функции.

Введение

Атмосферная коррекция — ключевой компонент обработки спутниковых данных о цвете вод. Стандартные алгоритмы атмосферной коррекции, используемые при обработке данных спутниковых сканеров цвета, несмотря на их значительное усовершенствование за последнее десятилетие, по-прежнему могут давать большие ошибки, особенно в коротковолновой области спектра в водах внутренних морей и прибрежных районах.

Анализ подспутниковых измерений, проведенных в экспедициях в юго-восточной Балтике в 2010 г., показал, что большая доля ошибок расчета биооптических параметров (концентрации хлорофилла-*a* и взвеси) связана с неудовлетворительной атмосферной коррекцией (Буканова и др., 2011). Для всех четырех сканеров цвета, данные которых использовались для анализа (MODIS-Aqua, MODIS-Terra, MERIS, SeaWIFS), наибольшие ошибки атмосферной коррекции наблюдались для коротковолновых каналов 412 и 443 нм, а приемлемые ошибки получались только для каналов с длиной волны $\lambda > 600$ нм. Эти результаты показали очевидную необходимость решения задачи атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета для юго-восточной Балтики с целью последующего усовершенствования региональных алгоритмов расчета биооптических параметров.

Материалы и методы

Натурные измерения спектральных коэффициентов яркости излучения, вышедшего из-под поверхности моря, были выполнены сотрудниками Лаборатории оптики океана

Института океанологии им. П.П. Ширшова (ИОРАН) в юго-восточной Балтике на 26 станциях посредством плавающего спектрорадиометра. Спектральный диапазон прибора — 390...700 нм; спектральное разрешение — 2,5 нм; точность измерений — 5 %. Для предотвращения влияния корпуса измерения проводятся на расстоянии порядка 30...50 м от борта судна (Артемьев и др., 2000).

Для анализа привлекались спутниковые данные четырех сканеров цвета: MERIS, MODIS-Aqua, MODIS-Terra, SeaWiFS. Для разработки регионального алгоритма атмосферной коррекции использовались данные сканеров MERIS и MODIS-Aqua, поскольку для них было получено наибольшее число данных подспутниковых измерений — 14 и 13, соответственно.

Решение задачи атмосферной коррекции

Разработанный региональный алгоритм атмосферной коррекции основан на использовании системы базисных функций, позволяющей восстанавливать значения спектрального коэффициента яркости моря во всем видимом диапазоне по спутниковым данным (Копелевич и др., 2009, Kopelevich et al., 2007). Система базисных функций построена на основе разложения по собственным векторам ковариационной матрицы спектральных значений коэффициента яркости водной толщи, рассчитанной для массива данных измерений, выполненных в юго-восточной Балтике плавающим спектрорадиометром. Анализ результатов статистической обработки показал, что сумма собственных значений двух первых собственных векторов ковариационной матрицы составляет 96 % от суммарной дисперсии. Это означает, что использование лишь двух первых собственных векторов позволяет с удовлетворительной для большинства случаев точностью аппроксимировать коэффициент яркости моря. Оцененная ошибка аппроксимации равна 0.0009.

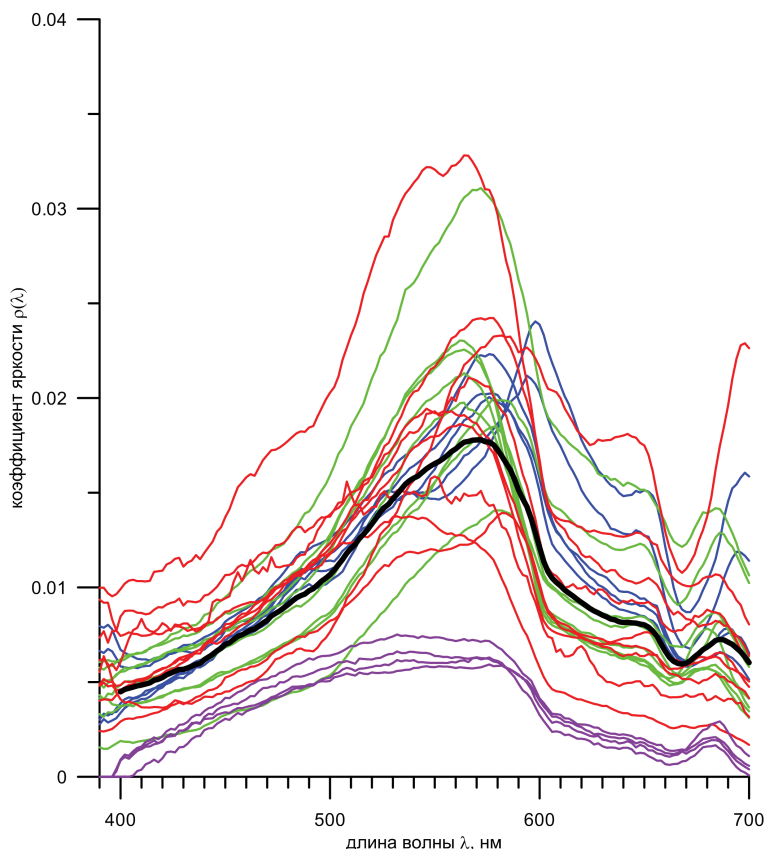


Рис. 1. Спектральные коэффициенты яркости водной толщи, измеренные в апреле-октябре 2010 г. в юго-восточной Балтике, и средний спектр $\langle \rho(\lambda_i) \rangle$, рассчитанный по всем данным

Разложение, используемое для расчета спектрального коэффициента яркости моря $\rho(\lambda_i)$, имеет вид (Копелевич и др., 2009, Kopelevich et al., 2007):

$$\rho(\lambda_i) = \langle \rho(\lambda_i) \rangle + C_1 \Psi_1(\lambda_i) + C_2 \Psi_2(\lambda_i), \quad (1)$$

где $\langle \rho(\lambda_i) \rangle$ — средние значения коэффициента яркости моря на длине волны λ_i ; $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$ — собственные векторы; C_1 и C_2 — коэффициенты разложения. Система базисных функции ($\langle \rho(\lambda_i) \rangle$, $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$) рассчитывалась по 26 измеренным *in situ* спектрам коэффициента яркости моря во всем видимом диапазоне 400...700 нм (рис. 1 и 2).

Неизвестные коэффициенты C_1 и C_2 разложения (1) рассчитывались методом наименьших квадратов по величинам коэффициента яркости моря, полученным стандартными алгоритмами атмосферной коррекции для спектральных каналов с длиной волны больше 500 нм, где ошибки стандартных алгоритмов атмосферной коррекции обычно заметно меньше (Буканова и др., 2011). Для MODIS Aqua использовалось 6 каналов: 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм; для MERIS — 5 каналов: 510, 560, 620, 665, 681 нм.

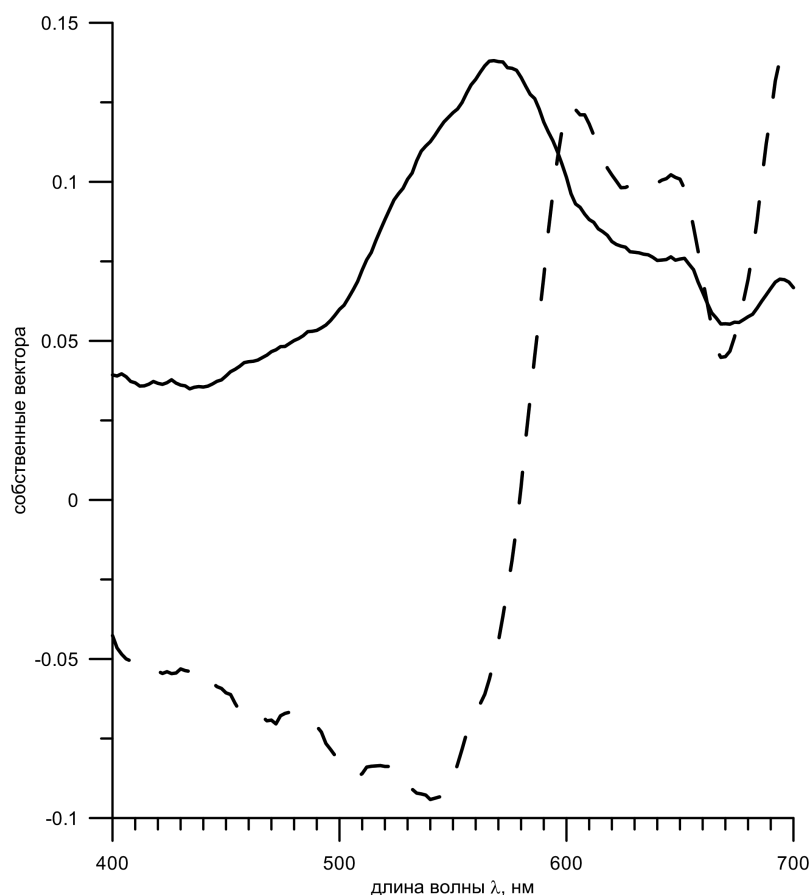


Рис. 2. Два первых собственных вектора $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$ по данным судовых измерений 2010 г. Сплошная линия — первый вектор, пунктирная — второй

Применение нового алгоритма для данных MODIS Aqua

Примеры сравнения результатов атмосферной коррекции MODIS Aqua с данными измерений *in situ* в юго-восточной Балтике представлены на рис. 3.

Региональная коррекция спектра во многих случаях позволяет исправить ошибки на коротковолновых каналах 412, 443, 469 и 488 нм (рис. 3а–в). Но если стандартный алгоритм атмосферной коррекции для длинноволновых каналов ($\lambda > 500$ нм) даёт большие

ошибки, то алгоритм региональной коррекции не может существенно улучшить соответствие между спутниковыми и натурными измерениями коэффициента яркости водной толщи (рис. 3г).

Среднеквадратические ошибки атмосферной коррекции стандартного алгоритма MODIS Aqua и предложенного регионального алгоритма по всем каналам MODIS Aqua в видимом диапазоне спектра (412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм) представлены в табл. 1. Для всех станций применение регионального алгоритма коррекции позволяет уменьшить ошибки атмосферной коррекции. И если стандартный алгоритм атмосферной коррекции дает «приемлемые» значения ошибки (не более 0,003) только для двух станций, то после применения регионального алгоритма таких станций восемь.

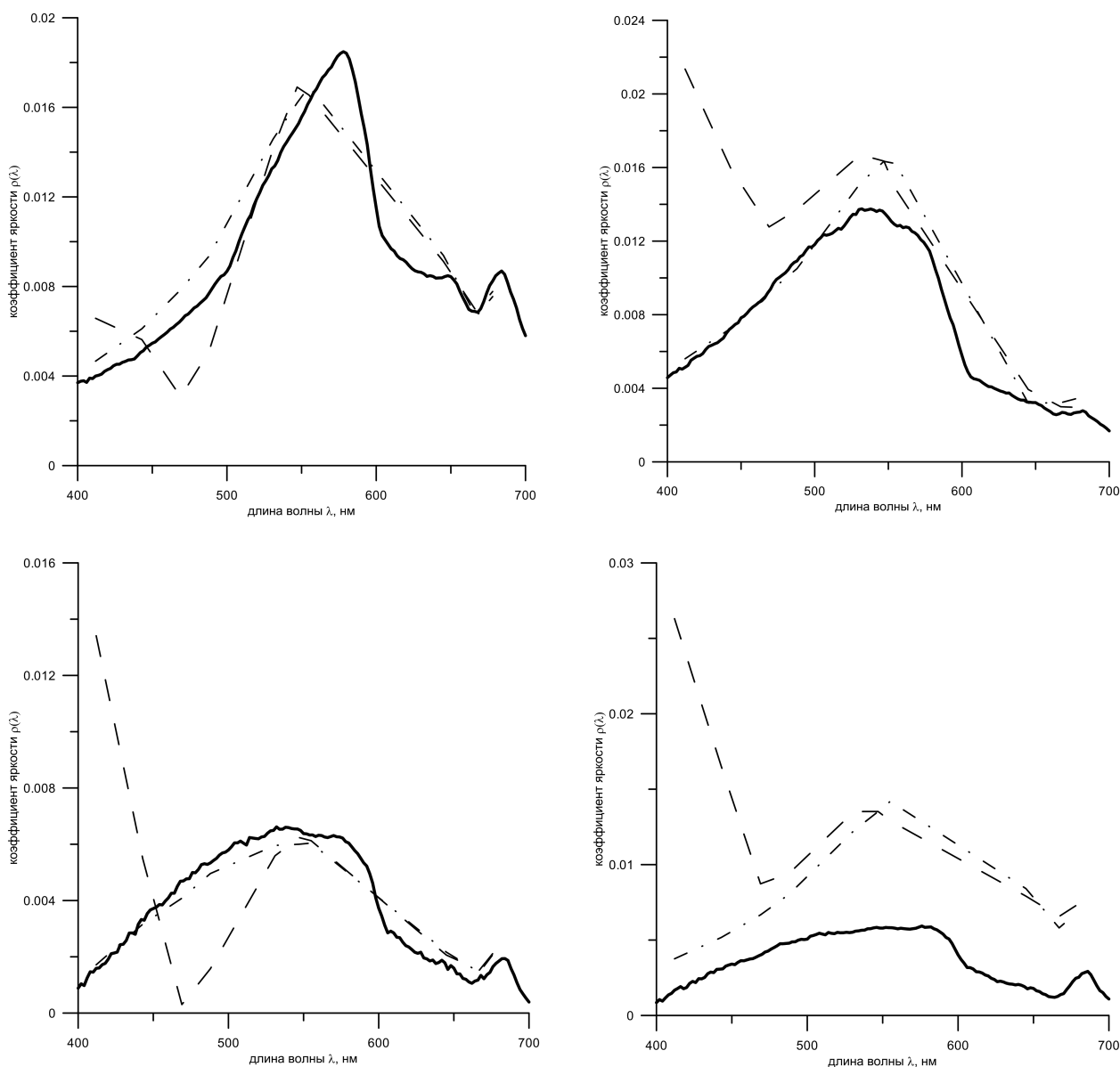


Рис. 3. Сравнение результатов атмосферной коррекции MODIS Aqua с данными судовых измерений в юго-восточной Балтике в 2010 г.
 Сплошная линия — измерения *in situ*, пунктирная — стандартный алгоритм MODIS, штрихпунктирная — алгоритм MODIS после региональной коррекции:
 а — 22.06.2010, станция № 5;
 б — 08.07.2010, станция № 5;
 в — 10.10.2010, станция № 4;
 г — 10.10.2010, станция № 5

Таблица 1. Среднеквадратические ошибки атмосферной коррекции MODIS Aqua. Жирным шрифтом выделены «допустимые» ошибки не более 0,003

Станция	Дата	Координаты	Концентрация хлорофилла-а, мкг/л	Концентрация взвеси, мг/л	Среднеквадратичные ошибки атмосферной коррекции MODIS Aqua	
					Стандартный алгоритм	После региональной коррекции
1	20.6.2010	54,8 N, 19,5 E	8,85	1,25	0,0073	0,0067
2	20.6.2010	55,0 N, 19,4 E	2,97	0,9	0,0048	0,0020
4	22.6.2010	55,0 N, 20,4 E	19,7	2,46	0,0108	0,0085
5	22.6.2010	55,2 N, 20,6 E	9,43	2,13	0,0017	0,0010
8	27.6.2010	55,2 N, 19,7 E	4,73	2,43	0,0057	0,0047
4	7.7.2010	55,3 N, 14,4 E	—	—	0,0025	0,0022
5	8.7.2010	55,4 N, 15,6 E	—	—	0,0062	0,0015
6	9.7.2010	55,2 N, 16,8 E	—	—	0,0122	0,0084
10	14.7.2010	55,3 N, 20,2 E	3,1	1,33	0,0070	0,0030
2	10.10.2010	55,0 N, 20,0 E	10,5	1,27	0,0059	0,0018
3	10.10.2010	55,0 N, 20,2 E	8,81	1,27	0,0046	0,0007
4	10.10.2010	55,0 N, 20,3 E	4,7	1,67	0,0042	0,0004
5	10.10.2010	55,0 N, 20,4 E	10,75	1,6	0,0104	0,0053

Применение нового алгоритма для данных MERIS

Стандартный алгоритм атмосферной коррекции MERIS часто сильно занижает, по сравнению с измеренными *in situ*, значения яркости восходящего излучения на длинах волн 412...490 нм, но дает вполне приемлемые значения при длинах волн 510...680 нм. Как видно из рис. 4, предложенный алгоритм региональной коррекции позволяет исправить ошибки стандартного алгоритма для коротковолновых каналов (412, 443 и 490 нм).

Среднеквадратические ошибки атмосферной коррекции стандартного алгоритма MERIS и предложенного алгоритма по всем видимым каналам MERIS (412, 443, 490, 510, 560, 620, 665, 681 нм) представлены в табл. 2. Как и в случае MODIS Aqua, практически для всех станций применение регионального алгоритма коррекции позволяет уменьшить ошибки атмосферной коррекции. Стандартный алгоритм атмосферной коррекции MERIS дает «приемлемые» значения ошибки (не более 0,003) для пяти станций, после применения регионального алгоритма таких станций уже восемь.

Таблица 2. Среднеквадратические ошибки атмосферной коррекции MERIS. Жирным шрифтом выделены «допустимые» ошибки не более 0,003

Станция	Дата	Координаты	Концентрация хлорофилла-а, мкг/л	Концентрация взвеси, мг/л	Среднеквадратичные ошибки атмосферной коррекции MERIS	
					Стандартный алгоритм	После региональной коррекции
3	21.6.2010	55,0 N, 19,9 E	22,23	3	0,0117	0,0057
4	22.6.2010	55,0 N, 20,4 E	19,7	2,46	0,0033	0,0010
5	22.6.2010	55,2 N, 20,6 E	9,43	2,13	0,0056	0,0021
6	24.6.2010	55,9 N, 19,1 E	4,98	1,6	0,0139	0,0054
8	27.6.2010	55,2 N, 19,7 E	4,73	2,43	0,0035	0,0033

Станция	Дата	Координаты	Концентрация хлорофилла-а, мкг/л	Концентрация взвеси, мг/л	Среднеквадратичные ошибки атмосферной коррекции MERIS	
					Стандартный алгоритм	После региональной коррекции
1	2.7.2010	54,8 N, 19,2 E	—	—	0,0028	0,0023
4	7.7.2010	55,3 N, 14,4 E	—	—	0,0036	0,0026
5	8.7.2010	55,4 N, 15,6 E	—	—	0,0026	0,0024
9	14.7.2010	54,9 N, 19,3 E	3,45	0,3	0,0167	0,0109
10	14.7.2010	55,3 N, 20,2 E	3,1	1,33	0,0038	0,0039
2	10.10.2010	55,0 N, 20,0 E	10,5	1,27	0,0028	0,0022
3	10.10.2010	55,0 N, 20,2 E	8,81	1,27	0,0018	0,0018
4	10.10.2010	55,0 N, 20,3 E	4,7	1,67	0,0104	0,0058
5	10.10.2010	55,0 N, 20,4 E	10,75	1,6	0,0023	0,0016

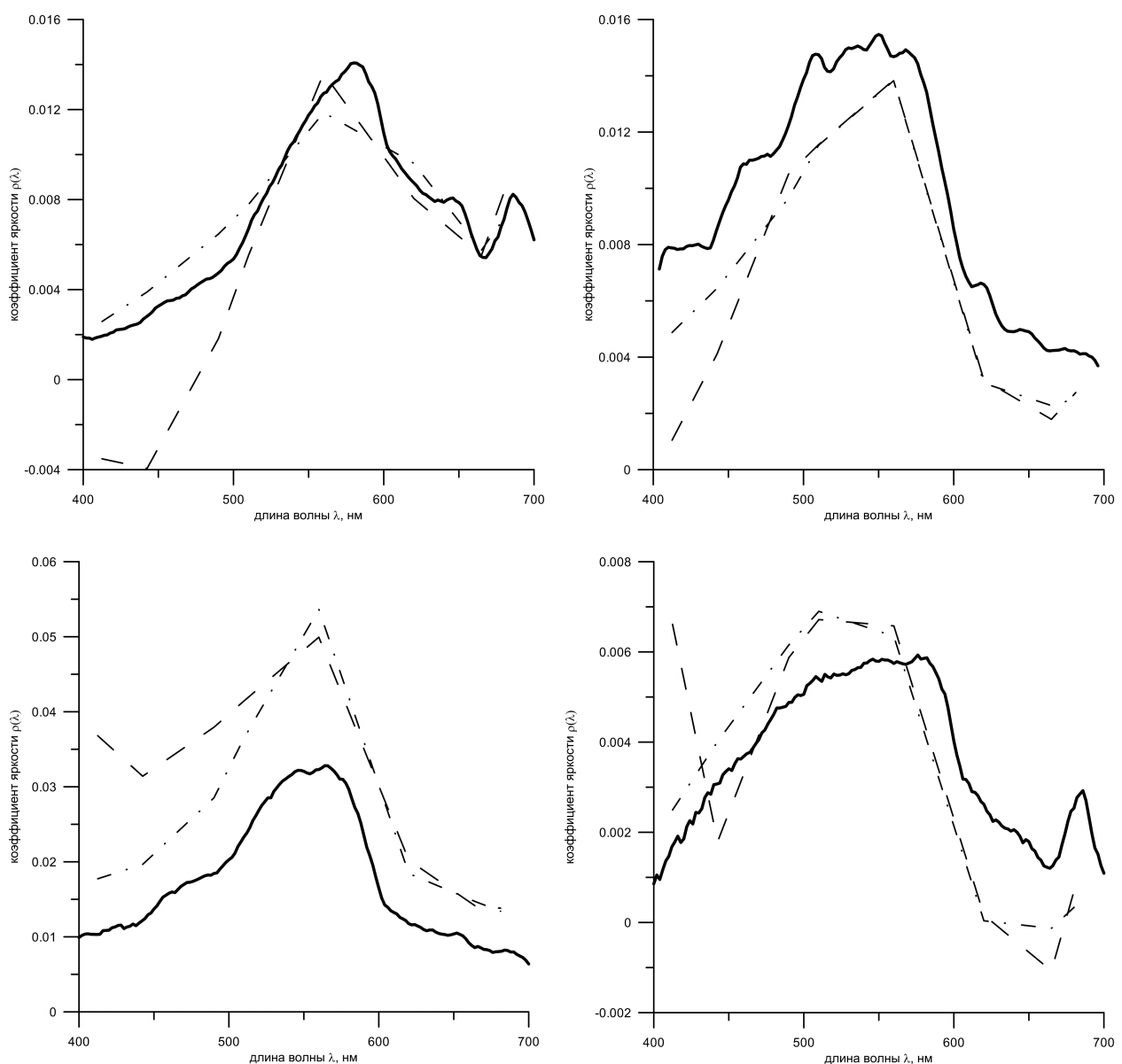


Рис. 4. Сравнение результатов атмосферной коррекции MERIS с данными судовых измерений в юго-восточной Балтике в 2010 г. Сплошная линия — измерения *in situ*, пунктирная — стандартный алгоритм MERIS, штрихпунктирная — алгоритм MERIS после региональной коррекции:
а — 22.06.2010, станция № 4; б — 07.07.2010, станция № 4;
в — 14.07.2010, станция № 9; г — 10.10.2010, станция № 5

Результаты совместного использования данных MODIS Aqua и MERIS

Анализ полученных результатов атмосферной коррекции спутниковых данных показал, что для станций, где были одновременные измерения MODIS-Aqua и MERIS, бывают случаи, когда один сканер даёт завышенные значения, а другой заниженные по сравнению с натурными подспутниковыми измерениями. В связи с чем, для 10 станций, где были одновременные измерения MODIS Aqua и MERIS, была проведена коррекция по объединенным данным обоих сканеров.

В этом случае неизвестные коэффициенты C_1 и C_2 разложения (1) рассчитывались методом наименьших квадратов по величинам коэффициента яркости моря, полученным стандартными алгоритмами атмосферной коррекции для спектральных каналов с длиной волны больше 500 нм обоих сканеров. Таких каналов 11: 510, 531, 547, 555, 560, 620, 645, 665, 667, 678, 681 нм. Примеры региональной коррекции по объединенным данным MODIS Aqua и MERIS представлены на рис. 5. Хорошее совпадение с данными натурных измерений получается в случаях, когда оба сканера дают небольшие ошибки в диапазоне 500...700 нм (рис. 5б, в) или один сканер даёт завышенные значения, а другой заниженные (рис. 5г–е). Если же один из спутников дает слишком большие ошибки атмосферной коррекции в диапазоне 500...700 нм, а другой хорошо соответствует данным подспутниковых измерений, то результаты совместного использования сканеров цвета хуже, чем для использования только одного спутника с хорошим совпадением в длинноволновых каналах (рис. 4а и 5а).

Среднеквадратические ошибки региональной коррекции объединенных данных сканеров MODIS Aqua и MERIS, рассчитанных по всем 16 каналам MODIS Aqua и MERIS в видимом диапазоне спектра (412, 443, 469, 488, 490, 510, 531, 547, 555, 560, 620, 645, 665, 667, 678, 681 нм), представлены в табл. 3. Для сравнения там же приведены ошибки при использовании данных каждого сканера по отдельности, рассчитанные также для вышеуказанных 16 каналов. Жирным шрифтом, как и в табл. 2, 3, выделены значения, удовлетворяющие критерию $\leq 0,003$; подчеркнуты значения, которые для объединенных данных лучше, чем при использовании данных каждого сканера в отдельности. Последние получились для четырех станций из десяти, но среднее значение ошибок по всем станциям для объединенных спутниковых данных немного меньше, чем для каждого сканера по отдельности. Хотя заметного улучшения при использовании объединенных данных не наблюдается, использовать совместно данные MODIS Aqua и MERIS целесообразно, поскольку это дает дополнительный контроль качества данных.

Таблица 3. Среднеквадратические ошибки атмосферной коррекции, рассчитанные по 16 длинам волн (412, 443, 469, 488, 490, 510, 531, 547, 555, 560, 620, 645, 665, 667, 678, 681 нм) объединенных данных MODIS-Aqua и MERIS и для каждого сканера по отдельности. Жирным шрифтом выделены допустимые ошибки (не более 0,003); подчеркнуты значения для случаев, когда ошибки MODIS+MERIS меньше, чем для каждого сканера по отдельности

Станции	Дата	Координаты	Среднеквадратические ошибки		
			MODIS+MERIS	MERIS	MODIS
4	22.6.2010	55,0 N, 20,4 E	0,0054	0,0009	0,0088
5	22.6.2010	55,2 N, 20,6 E	0,0010	0,0024	0,0011
8	27.6.2010	55,2 N, 19,7 E	0,0042	0,0036	0,0046
4	7.7.2010	55,3 N, 14,4 E	0,0023	0,0023	0,0023
5	8.7.2010	55,4 N, 15,6 E	0,0019	0,0028	0,0015
10	14.7.2010	55,3 N, 20,2 E	0,0030	<u>0,0042</u>	<u>0,0032</u>
2	10.10.2010	55,0 N, 20,0 E	0,0010	0,0023	0,0018
3	10.10.2010	55,0 N, 20,2 E	0,0007	0,0020	0,0008
4	10.10.2010	55,0 N, 20,3 E	0,0022	0,0065	0,0004
5	10.10.2010	55,0 N, 20,4 E	0,0033	0,0015	0,0055
Среднее значение ошибок по всем станциям			0,0025	0,0028	0,0030

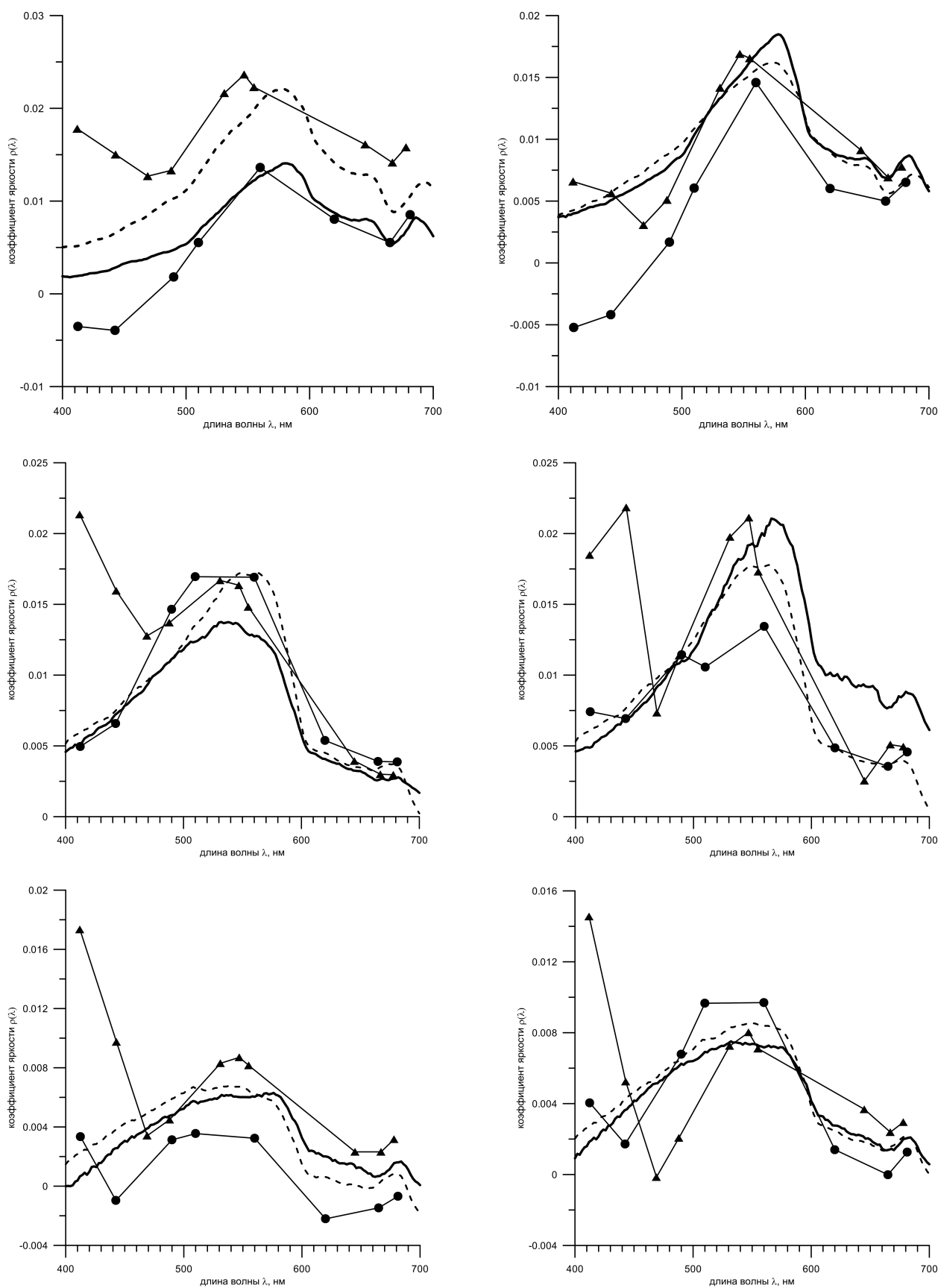


Рис. 5. Сравнение результатов атмосферной коррекции совместных данных MODIS Aqua и MERIS с данными судовых измерений в юго-восточной Балтике в 2010 г. Сплошная линия — измерения *in situ*, треугольники — стандартный алгоритм MODIS Aqua, кружки — стандартный алгоритм MERIS, пунктирная линия — коррекция собственными векторами по объединённым данным MODIS Aqua и MERIS: а — 22.06.2010, станция № 4; б — 22.06.2010, станция № 5; в — 08.07.2010, станция № 5; г — 14.07.2010, станция № 10; д — 10.10.2010, станция № 2; е — 10.10.2010, станция № 3

Заключение

На основе проведенных в Балтийском море натурных измерений спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения посредством плавающего спектрорадиометра разработан региональный алгоритм атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua и MERIS. Выполненная региональная коррекция спутниковых коэффициентов яркости моря, показала лучшие результаты в коротковолновой области спектра по сравнению со стандартными спутниковыми алгоритмами. Совместное использование данных MODIS Aqua и MERIS так же позволило немного сократить ошибки атмосферной коррекции.

Однако, ошибки атмосферной коррекции неизбежны вследствие различий в условиях измерения *in situ* и на спутниковых сканерах. К сожалению, для осуществления хорошей региональной атмосферной коррекции пока слишком мало подспутниковых измерений коэффициента яркости моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-05-90760-моб_ст.). Авторы выражают благодарность сотрудникам ИОРАН А.В. Григорьеву, А.Н. Храпко и В.А. Артемьеву за проведение натурных измерений.

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. Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Александров С.В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2011. Вып. 8. Т. 2. С. 64–73.
3. 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. 1. С. 400–408.
4. Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Vazyulya S. V., Zolotov I. G., Bailey S. W. New approach to atmospheric correction of satellite ocean color data // Proc. SPIE. 2007. V. 6615. 661502.

Development of regional algorithms for the atmospheric correction of satellite ocean color data in the South-Eastern Baltic

T. Bukanova¹, S. Vazyulya², O. Kopelevich², V. Burenkov², S. Sheberstov², S. Aleksandrov³

¹ *Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS*

236000, Kaliningrad, Mira prospect, 1

E-mail: felice04@rambler.ru

² *P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS,*

117851, Moscow, Nakhimovskiy prospect, 36

E-mail: oleg@ocean.ru

³ *Atlantic Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography,*

236000, Kaliningrad, D. Donskogo, 5

E-mail: hydrobio@mail.ru

The studies carried out in 2010–2011 on the development of regional algorithms for calculating the concentration of *chlorophyll-a* and suspended matter in the South-Eastern Baltic from data of the satellite color scanners have shown that a large proportion of errors of calculation of these parameters is associated with poor atmospheric correction. This paper presents results of our attempt to improve the atmospheric correction for the South-Eastern Baltic through the development of regional algorithms. Based on data from field measurements of the spectral radiance reflectance by a floating spectroradiometer, the approach to solving the problem of atmospheric correction, previously developed by specialists of SIO RAS for other seas, was implemented. The possibility of joint use of data from MODIS and MERIS scanners was tested.

Keywords: South-Eastern Baltic, ocean color sensors MODIS and MERIS, regional algorithms, atmospheric correction, basis functions.