

**Оптические свойства черноморского аэрозоля
и верхнего слоя морской воды
по данным прямых и спутниковых измерений**

© 2016 В.В. Суслин*, В.Х. Слабакова**, Д.В. Калининская*,
С.Ф. Пряхина*, Н.И. Головкин*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: slava.suslin@gmail.com

**Институт океанологии БАН, Варна, Болгария

Поступила в редакцию 27.10.2015 г. После доработки 24.11.2015 г.

В работе дан анализ качества восстановления основных характеристик аэрозоля (аэрозольной оптической толщины АОТ, параметра Ангстрема \AA) и спектра восходящего из-под поверхности воды излучения (нормализованной яркости света nL_w), полученных в результате применения стандартной атмосферной коррекции данных спутниковых измерений яркости восходящего излучения над Черным морем сканерами цвета морской воды *MODIS-Aqua/Terra* и *VIIRS-SNPP*. Основой для анализа являлись натурные измерения, выполненные на станциях сетей *AERONET* и *AERONET-OC* синхронно со спутниковыми.

Совместный анализ данных синхронных прямых и спутниковых измерений выявил наличие проблем корректного описания основных оптических параметров черноморского аэрозоля с применением аэрозольных моделей, которые используются при выполнении стандартной атмосферной коррекции. Продемонстрирован «компенсационный» эффект (т. е. отрицательный наклон связи разностей значений АОТ и \AA , полученных по натурным и спутниковым данным), и сделана оценка его влияния на качество стандартной атмосферной коррекции. Показано, что для текущей версии атмосферной коррекции абсолютные значения спектра nL_w оказались заниженными по сравнению с данными прямых измерений. Более близкий к натурным данным результат можно получить путем нормировки спутникового спектра nL_w на его значение в канале 490 нм.

Ключевые слова: *AERONET*, сканеры цвета морской воды, качество атмосферной коррекции, Черное море.

Введение. За последние 10 – 20 лет, благодаря бурному развитию наблюдательных систем, включая наземные [1 – 5] и спутниковые [6, 7], накоплены многолетние ряды данных о параметрах, характеризующих свойства атмосферного аэрозоля: аэрозольной оптической толщине (τ , или АОТ) и параметре Ангстрема (α , или \AA). Обе эти характеристики являются ключевыми при выполнении атмосферной коррекции яркости восходящего излучения, регистрируемого спутниковыми приборами над водной поверхностью [8, 9]. Поэтому от точности значений АОТ и \AA зависит точность восстановления спектра нормализованной яркости света (nL_w), вышедшего из-под поверхности воды [10]. Количественные характеристики этого спектра позволят выйти на решение целого ряда новых важных и интересных задач, одной из которых является восстановление видового состава фитопланктона по спутниковым

многоспектральным измерениям яркости восходящего излучения системы океан – атмосфера [11, 12]. Вследствие внутриконтинентального географического положения Черного моря и его изолированности от Мирового океана свойства черноморского аэрозоля могут существенно отличаться от свойств океанического [13]. Поэтому одна из задач нашего исследования состояла в том, чтобы на основании прямых измерений станций сети *AERONET* (*A*Erozo*l* *R*Obotic *N*ETwork) определить, к какому из типов аэрозоля, характерных для земной атмосферы, по своим оптическим параметрам относится черноморский аэрозоль.

Ранее в работе [14] был проведен сравнительный анализ двумерных гистограмм АОТ и \AA черноморского аэрозоля по двум отдельным выборкам, состоящим либо из спутниковых данных, либо из данных измерений севастопольской станции сети *AERONET*. В этой работе было показано, что на качество восстановления спутниковых данных по АОТ и \AA влияет бликовая компонента от границы раздела вода – воздух и что наилучший в среднем результат, в смысле точности восстановления значений АОТ, достигается в районе длины волны 500 нм. Однако с момента публикации статьи [14] было проведено несколько обновлений версий спутниковых данных [15]. В связи с этим вторая задача состояла в исследовании качества спутниковых данных по АОТ и \AA для текущей версии их обработки. Для решения такой задачи в настоящей работе было проведено сравнение оптических характеристик черноморского аэрозоля, полученных синхронно по данным измерений на станции сети *AERONET* и соответствующим спутниковым данным. Результаты такого анализа напрямую связаны с качеством восстановления спектра nLw . Отсюда вытекает третья задача – сравнение значений прямых измерений и спутниковых данных о спектре nLw в условиях контролируемого качества восстановления оптических характеристик черноморского аэрозоля.

Исходные данные и методики. В работе использованы данные станций сети *AERONET* (*level* 2.0): по АОТ на длине волны 870 нм и \AA для двух спектральных интервалов 440 – 870 и 380 – 500 нм. Значения параметров рассчитаны с помощью метода *Direct Sun Algorithm* [16]. Информация о станциях представлена в табл. 1. Кроме того, для специальных случаев использовались данные модельных расчетов об обратных траекториях воздушных масс [17, 18] для севастопольской станции сети *AERONET* [1].

Атмосферные спутниковые данные по АОТ и \AA текущей версии второго уровня для двух приборов *MODIS* и *VIIRS* со спутников *Aqua*, *Terra* и *SNPP* были использованы для создания выборки, синхронной с данными соответствующих измерений на трех черноморских станциях сети *AERONET*: *Galata*, *Gloria* и *Seavastopol* (см. табл. 1). Предварительно была проведена обработка данных ежедневных съемок, охватывающих акваторию Черного моря. Она состояла из двух этапов. На первом этапе была выполнена браковка всех спутниковых данных второго уровня с учетом масок: *glint*, *high degree polarization*, *stray light*, *coccolithophores* [19]. На втором – после браковки эти данные были проинтерполированы на сетку с шагом $0,025^\circ$ по широте и $0,035^\circ$ по долготе. Синхронная выборка состояла из данных только таких измерений, которые по времени различались не более чем на 5 мин. Для ат-

сферных спутниковых данных рассматривалась окрестность до двух узлов сетки (± 6 км) от места расположения станции сети *AERONET*, для которой вычислялись средние значения АОТ и \AA . Кроме того, на двух черноморских станциях *Gloria* и *Galata* сетей *AERONET* и *AERONET-OC* (*AERozol RObotic NETwork-Ocean Color*) одновременно с измерениями оптических параметров атмосферы выполнялись измерения оптических характеристик верхнего слоя воды, которые включали спектр nLw с центрами длин волн 412, 441, 491, 530, 555 и 675 нм [20, 21]. Для решения третьей задачи мы ограничились использованием данных измерений, выполненных на станции *Gloria*, так как они содержат более длинный ряд по времени по сравнению со станцией *Galata*, которая только начала работать. Для получения спектра nLw по спутниковым данным рассматривалась окрестность ± 1 узел сетки, или ± 3 км.

Т а б л и ц а 1

Информация о станциях сети *AERONET*, для которых проводился анализ данных в рассматриваемой статье

Название станции	Руководители работ	Период наблюдений	Широта	Долгота
<i>Tomsk</i>	B. Holben, M. Panchenko	24.10.2002 – 20.04.2013	56,477°с. ш.	85,047°в. д.
<i>Sevastopol</i>	B. Holben	14.05.2006 – 30.08.2013	44,616°с. ш.	33,517°в. д.
<i>OPAL</i>	N. O'Neill, I. Abboud, V. Fioletov	01.04.2007 – 18.09.2013	79,990°с. ш.	85,939°з. д.
<i>Galata</i>	G. Zibordi	12.04.2014 – 20.07.2014	43,045°с. ш.	28,193°в. д.
<i>Tahiti</i>	B. Holben	24.07.1999 – 26.10.2009	17,577°ю. ш.	149,606°з. д.
<i>Gloria</i>	G. Zibordi	25.01.2011 – 22.02.2014	44,600°с. ш.	29,360°в. д.
<i>Tamanrasset INM</i>	E. Cuevas-Agullo	30.09.2006 – 08.12.2012	22,790°с. ш.	5,530°в. д.
<i>Manaus</i>	P. Artaxo	01.02.2011 – 28.05.2014	2,891°ю. ш.	59,970°з. д.

Результаты и обсуждение. Ниже представлены результаты сравнительного анализа параметров аэрозоля над Черным морем и другими районами с использованием только измерений станций сети *AERONET*. Цель этого анализа состояла в том, чтобы понять, к какому из типов аэрозоля земной атмосферы по параметрам АОТ и \AA относится черноморский аэрозоль. Для этого в координатах $\{\tau(870), \alpha(440 - 870)\}$ были рассмотрены несколько характерных районов, включая Арктику, Океанию, экваториальную область тропиче-

ских лесов в Бразилии, пустыню Сахару, континентальную часть Сибири и район Черного моря (табл. 1). Результаты этого сравнения показаны на рис. 1.

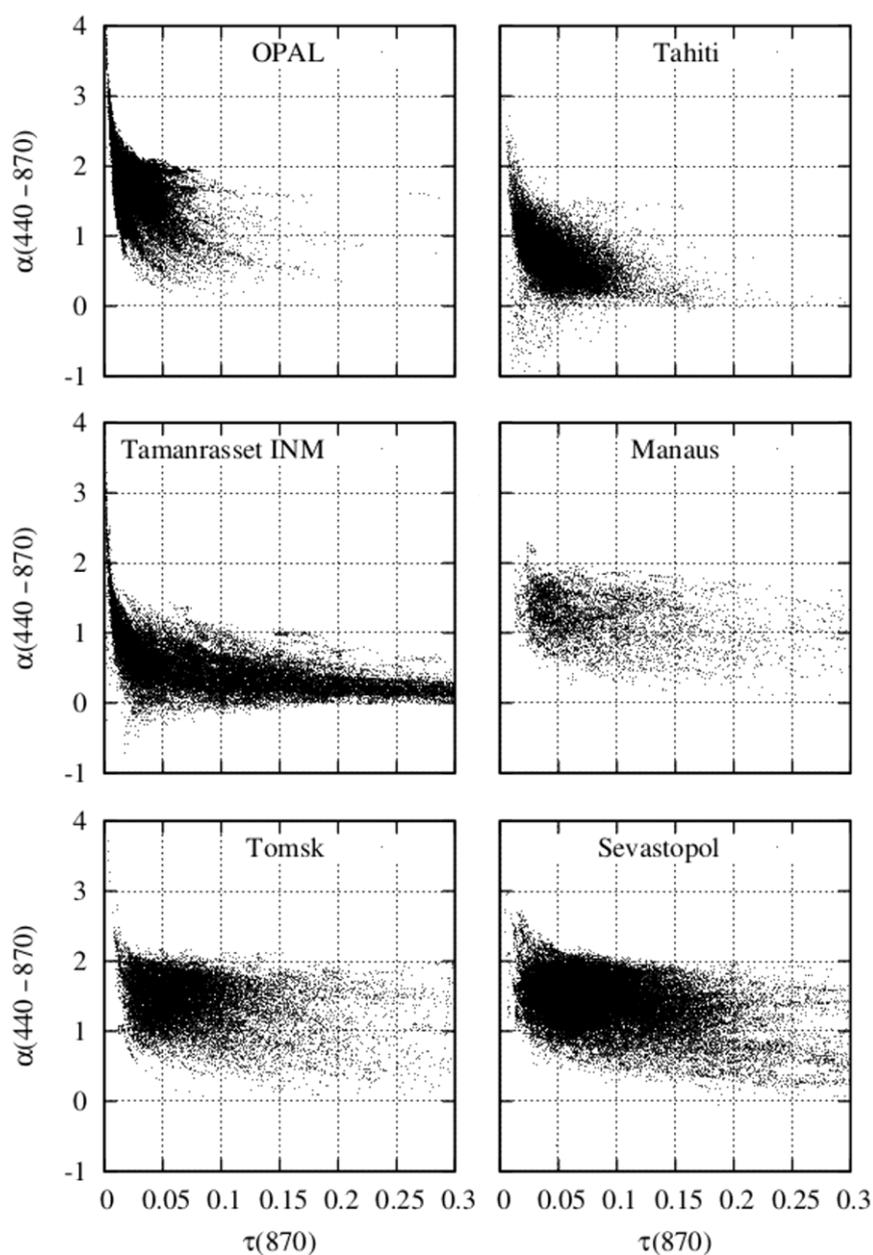


Рис. 1. Связь между значениями $\tau(870)$ и $\alpha(440 - 870)$ за весь период наблюдений по данным станций сети AERONET для разных районов: *OPAL* (Арктика), *Tahiti* (Тихий океан), *Tamanrasset INM* (пустынный район Сахары), *Manaus* (экваториальный район в амазонской сельве), *Tomsk* (Сибирь), *Sevastopol* (Черное море)

Для этих станций четко выделяются четыре типа аэрозоля: арктический, океанический, пустынный и континентальный. По рассматриваемым оптиче-

ским характеристикам черноморский аэрозоль оказался практически идентичен континентальному (станция *Tomsk*). Несколько неожиданным является результат совпадения характеристик континентального аэрозоля с параметрами аэрозоля на станции *Manaus*. Единственная отличительная особенность последнего – относительно однородное распределение α для $\tau(870) > 0,1$. В то же время для станций *Tomsk* и *Sevastopol* имеет место, как минимум, двухмодовый характер гистограммы $\alpha(440 - 870)$. На рис. 2, б для станции *Sevastopol* отражено это специфическое свойство на примере подмножества $[0,25; 0,3]$ из основной выборки по $\tau(870)$.

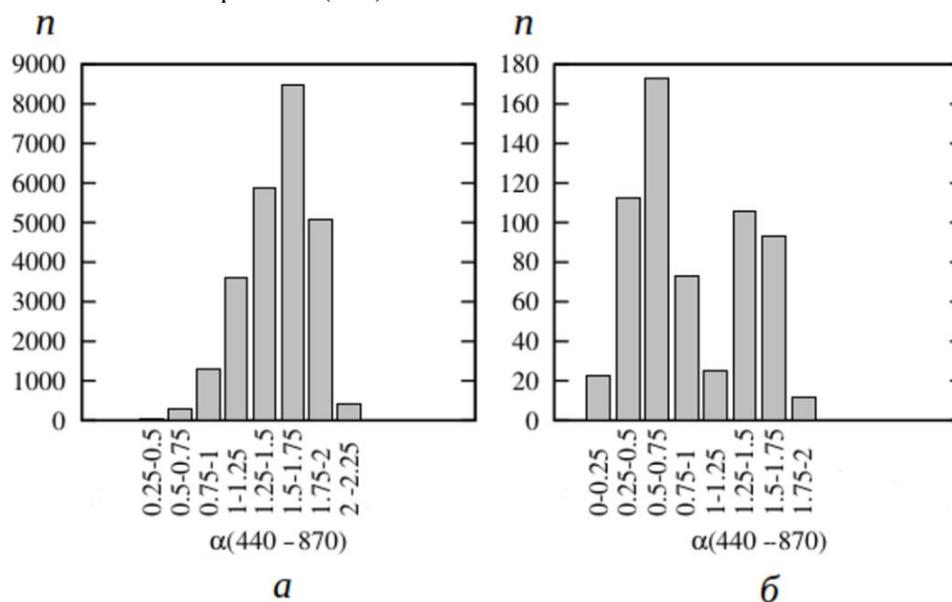


Рис. 2. Гистограммы \tilde{A} для двух выборок АОТ, полученных по данным севастопольской станции сети *AERONET*: *a* – $\tau(870) = [0,05; 0,1]$, $N = 25117$, *б* – $\tau(870) = [0,25; 0,3]$, $N = 617$ (где N – число измерений в каждой выборке, n – число измерений)

Для выявления возможных причин двухмодовой структуры гистограммы α для $\tau(870) > 0,1$ были подготовлены две другие выборки для двух интервалов α : $[1,5; 2]$ и $[0; 0,5]$. Анализ трехсуточных данных обратных траекторий воздушных масс для каждой из этих выборок показал, что большим значениям \tilde{A} соответствуют воздушные массы, пришедшие с севера, северо-востока и северо-запада, а малым значениям \tilde{A} – воздушные массы, пришедшие с южного направления: из Турции, с Аравийского п-ова и из пустыни Сахары (см. рис. 3). Максимум событий для больших значений \tilde{A} приходится на май – июнь, для малых – на июль – август. На станциях *Gloria* и *Galata* свойства аэрозоля были аналогичны тем, которые получены на станции *Sevastopol* (рисунки здесь не приведены). Различие заключалось лишь во временном ряде, который для севастопольской станции был существенно больше, что сказалось на плотности событий в аналогичных ячейках на плоскости в координатах $\{\tau(870), \alpha(440 - 870)\}$ на рис. 1. Последнее обстоятельство позволило составить более представительную выборку данных, результаты анализа которых показаны на рис. 3. Заметим, что характеристики $\tau(870)$ и $\alpha(440 - 870)$

хотя и относятся к основным оптическим параметрам аэрозоля, но далеко не исчерпывают их.

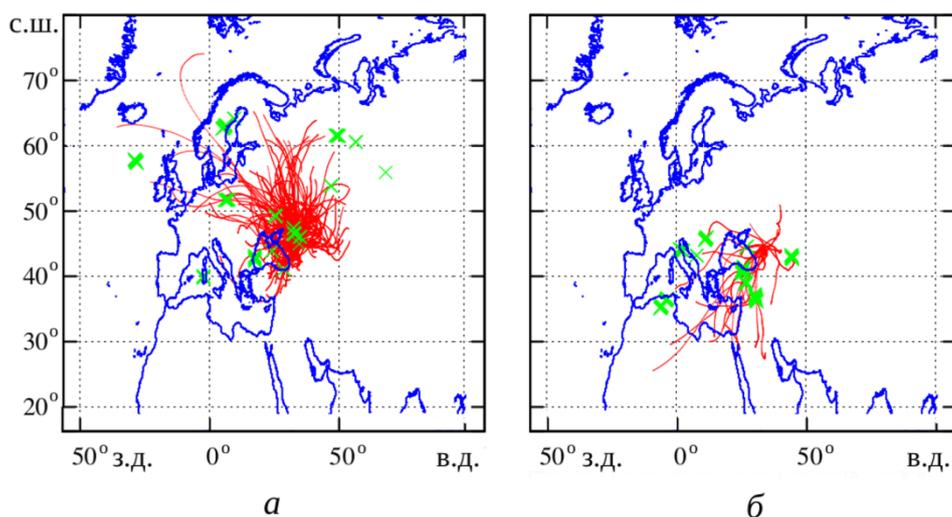


Рис. 3. Маршруты движения воздушных масс для слоя 800 – 900 мбар (сплошные линии) по данным трехсуточного анализа обратных траекторий и расположение (символы) мест генерации интенсивного подъема воздушных масс из нижних слоев атмосферы, определенных по методике из работы [22] для двух выборок по данным севастопольской станции сети AERONET для $\tau(870) > 0,1$: *a* – $\alpha = [1,5; 2]$, *б* – $\alpha = [0; 0,5]$

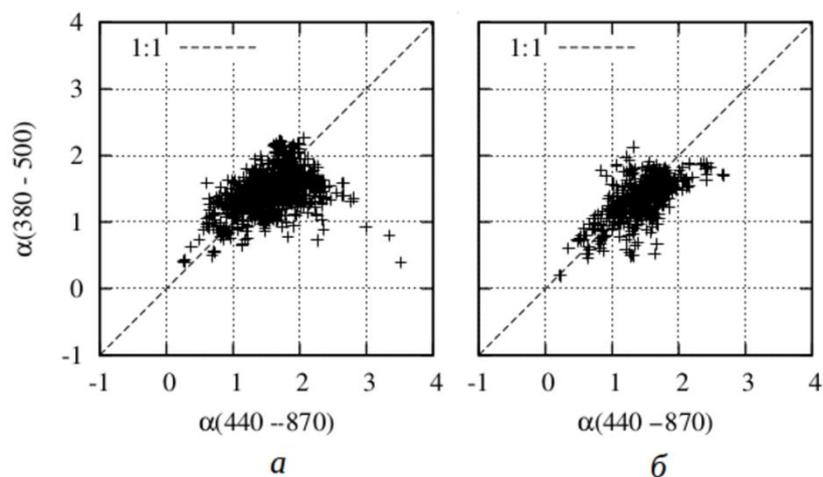


Рис. 4. Связь между значениями $\alpha(440 - 870)$ и $\alpha(380 - 500)$ по данным синхронной выборки для станций сети AERONET: *a* – Sevastopol, *б* – Gloria

Подробнее рассмотрим другое свойство аэрозоля (изменения величины Δ в зависимости от спектрального интервала), важное для корректного выбора аэрозольной модели при выполнении атмосферной коррекции. Объединенная выборка синхронных измерений позволяет проанализировать связь между $\alpha(440 - 870)$ и $\alpha(380 - 500)$, полученными по данным станций сети AERONET

с 8 до 11 ч по Гринвичу, т. е. во время измерений со спутников над Черным морем. Критерии формирования синхронной выборки описаны выше в разделе «Исходные данные и методики». Эта связь интересна с точки зрения качества восстановления спектра nLw . На рис. 4 на примере двух черноморских станций представлен результат такого сравнения. С одной стороны, очевидно существование доминирующей связи (вытянутость вдоль линии 1:1). С другой стороны, имеют место события, когда отклонения от линии 1:1 достаточно большие. Поскольку речь идет только о прямых измерениях, то, если не учитывать изменение спектрального хода параметра \AA при выполнении атмосферной коррекции, это, безусловно, приведет к искажению спектра nLw в коротковолновой области.

Дополнительная важная информация была получена из анализа временного ряда разности $\Delta\alpha = \alpha(440 - 870) - \alpha(380 - 500)$ на примере данных сева-стопольской станции (рис. 5). Обращает на себя внимание сильная межгодовая изменчивость, которая наиболее ярко выражена для 2011 и 2012 гг. на фоне остальных лет. Связано ли это с появлением какого-то необычного аэрозоля в районе Черного моря или с другой причиной? Ответ на этот вопрос требует отдельного исследования. Отметим только, что максимальные положительные значения $\Delta\alpha$, за исключением 2011 и 2012 гг., как правило, наблюдаются в основном в летние месяцы, что, вероятно, связано с присутствием поглощающего аэрозоля. В частности, это было установлено в работе [22] при анализе оптических свойств воздушных масс, пришедших из южных по отношению к Черному морю районов.

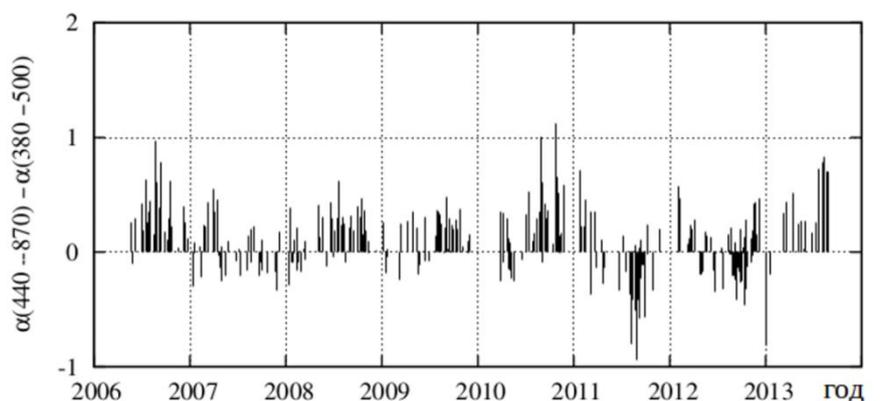


Рис. 5. Межгодовая и сезонная изменчивость разности между значениями $\alpha(440 - 870)$ и $\alpha(380 - 500)$ по данным синхронной выборки для сева-стопольской станции сети *AERONET*

Результаты сравнения значений АОТ и \AA , полученных по данным спутниковых и прямых измерений на сева-стопольской станции сети *AERONET* для объединенной синхронной выборки, представлены на рис. 6. Первое, что обращает на себя внимание, это завышение спутниковых данных по АОТ в подавляющем числе случаев по сравнению с ее наземными измерениями, которое нельзя объяснить разностью длин волн для этого параметра. Второе – отсутствие связи между спутниковыми данными по параметру \AA и его пря-

мыми измерениями на станции сети *AERONET*. Что касается АОТ, то аналогичные результаты были получены в статье [23]. Более подробный анализ этой выборки показывает существование «компенсации» одного параметра другим, т. е. для завышенных спутниковых значений АОТ по сравнению с синхронными наземными измерениями величина спутникового значения \dot{A} оказывается заниженной относительно измерений станций сети *AERONET* и наоборот. Отрицательный наклон линейной связи (рис. 7, а) разностей значений двух параметров указывает на «компенсационное» поведение спутниковых данных по АОТ и \dot{A} по отношению к их реальным значениям – измерениям на севастопольской станции сети *AERONET*. Аналогичный результат дает анализ данных для двух других черноморских станций сети *AERONET* – *Galata* и *Gloria* (рис. 7, б). Что касается подобных сравнений здесь и ниже, нужно оговориться, что на эти результаты может оказывать влияние как квазисинхронность измерений (в нашем случае < 5 мин), так и разный пространственный масштаб осреднения сигнала на поверхности моря (*AERONET* – ~1 м, спутник – ±2 узла сетки, или ±6 км).

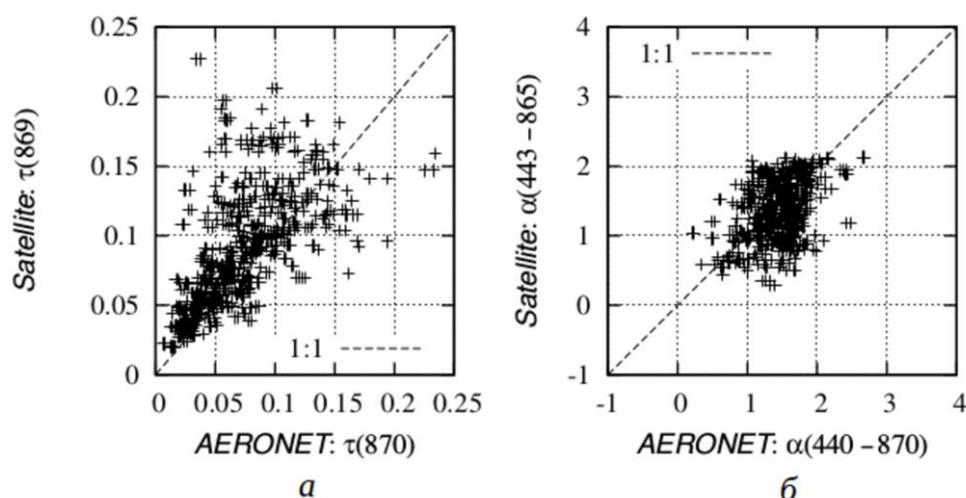


Рис. 6. Связь между значениями АОТ (а) и \dot{A} (б) для синхронных измерений севастопольской станции сети *AERONET* и объединенных спутниковых данных сканеров цвета морской воды *MODIS-Aqua/Terra* и *VIIRS-SNPP*

Такой «компенсационный» эффект приводит к тому, что в районе длины волны 500 нм значение АОТ близко к данным прямых измерений, а следовательно, можно ожидать и более высокой точности восстановления спектра nL_w в окрестности этой длины волны, что согласуется с выводами работы [14]. Чтобы проверить этот факт, из объединенной выборки были рассмотрены три специальных случая изменения разностей АОТ и \dot{A} , отмеченных на рис. 7, б цифрами 1, 2 и 3 соответственно. Для этих случаев были сопоставлены спектры nL_w , полученные по спутниковым данным из окрестности ±1 узла сетки (или ±3 км), с прямыми измерениями на станции *Gloria* сети *AERONET-OC*. Результат этого сравнения показан на рис. 8. Конкретные характеристики условий наблюдения этих трех спектров nL_w приведены в табл. 2.

Некоторые характеристики исходных данных для выборок 1, 2 и 3, представленных на рис. 7, б

Выборка	Дата	MODIS	Gloria, AERONET- OC	Gloria, AERONET			
		ч:мин	ч:мин	ч:мин	α (440-870)	α (380-500)	τ (870)
1	10.08.2012	T 09:00	08:40	08:39	1,63	1,45	0,135
	10.08.2012	A 10:40	11:40	10:54 11:41	1,88 1,82	1,68 1,65	0,098 0,107
2	06.09.2011	A 11:10	11:13	11:13	1,89	1,71	0,086
3	08.08.2013	A 11:25	11:13	11:13	1,40	1,10	0,142

Примечание: T – спутник Terra, A – спутник Aqua; жирным шрифтом выделена дополнительная информация по выборке 1; время указано по Гринвичу.

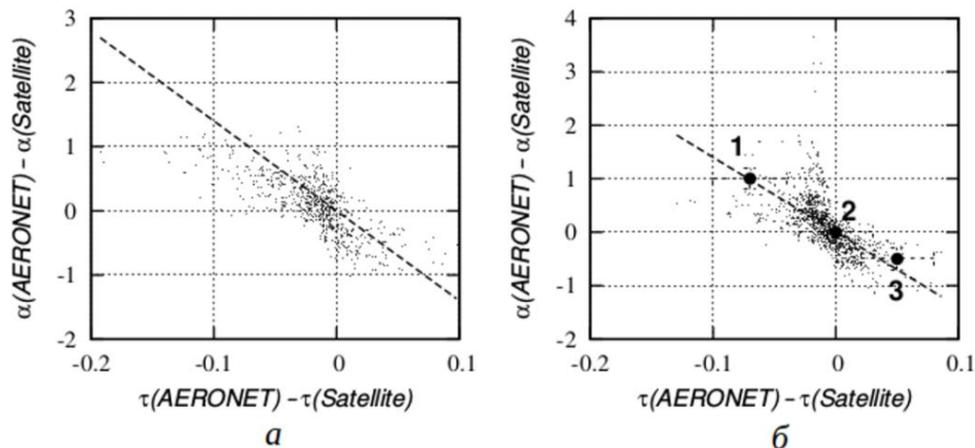


Рис. 7. «Компенсационное» поведение разности (штриховая линия) между значениями АОТ и Δ по данным прямых (AERONET: $\alpha(440 - 870)$ и $\tau(870)$) и спутниковых (Satellite: $\alpha(443 - 865)$ и $\tau(869)$) измерений в синхронной выборке за весь период наблюдений на двух станциях сети AERONET: а – Sevastopol, б – Gloria (кружочками обозначены положения выборок 1, 2 и 3, для которых выполнен совместный анализ данных синхронных измерений спектра nLw на станции Gloria и спутниковыми сканерами цвета морской воды)

Отметим, что только для случая 1 не существует данных синхронных (< 5 мин) измерений спектра nLw со спутников и на станции Gloria. В связи с чем для этого случая были рассмотрены измерения со спутников Aqua и Terra для трех ближайших по времени измерений оптических параметров аэрозоля. Параметры аэрозоля в рассматриваемый интервал времени были стабильны ($\Delta\alpha > 0$), спектры nLw по спутниковым данным и измерениям станции Gloria были также стабильны. Поэтому на рис. 8 не показаны спектры nLw , соответствующие данным выборки 1, указанным в табл. 2 жирным шрифтом. Как и

ожидалось, между спутниковыми спектрами nLw и их прямыми измерениями наблюдаются различия. Во-первых, для всех трех выборок значения прямых измерений nLw были систематически завышены по сравнению со спутниковыми данными. Во-вторых, наилучший результат наблюдался в спектральном канале (СК) с центральной длиной волны 443 нм. В-третьих, результат сравнения нормировок спектров nLw на соответствующее значение в СК 490 нм позволяет говорить о хорошем согласовании натуральных и спутниковых данных. Близкий результат был получен ранее в работе [14]. Заметим, что во всех трех случаях в СК 412 нм нормированные значения спектра nLw для прямых измерений оказались выше спутниковых данных. На наш взгляд, это результат того, что $\Delta\alpha > 0$, т. е. это связано с уменьшением параметра Å в коротковолновой части спектра по сравнению с длинноволновой. Мы полагаем, что одна из причин расхождения между данными прямых и спутниковых измерений состоит в некорректном описании оптических характеристик реального аэрозоля над Черным морем набором моделей, используемых при выполнении стандартной атмосферной коррекции [9], а именно если при коррекции не учитываются изменения спектрального хода параметра Å .

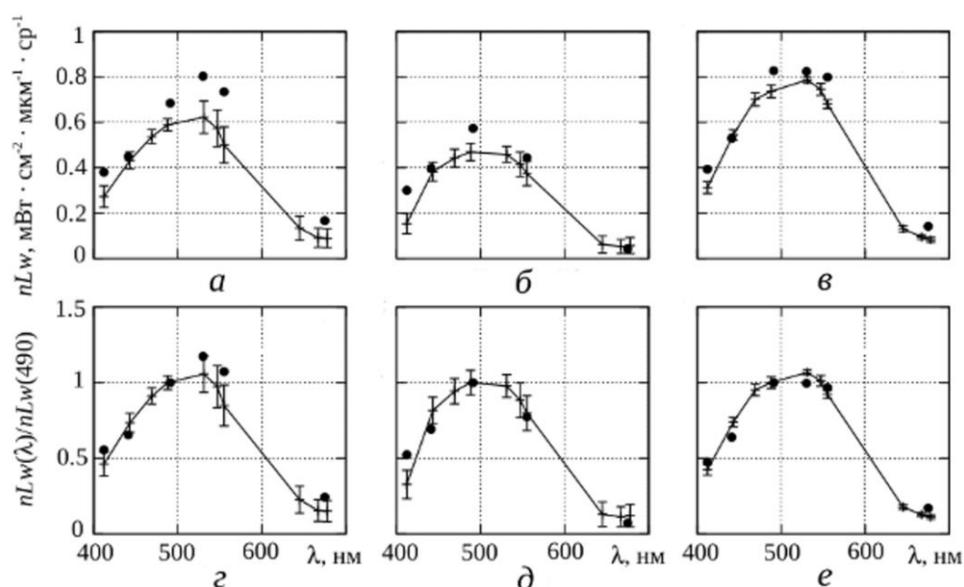


Рис. 8. Результаты сравнения спектров nLw (*а, б, в*) и их нормировки (*г, д, е*) на значение в канале 490 нм, полученных на станции *Gloria* сети *AERONET-OC* (кружочки), со спутниковыми данными (сплошная линия) для трех случаев, отмеченных на рис. 7, б цифрами 1 (*а, г*), 2 (*б, д*) и 3 (*в, е*) (вертикальными отрезками обозначены доверительные интервалы)

Рассмотрим, к каким ошибкам может привести наблюдаемое несоответствие спутниковых и натуральных данных при их дальнейшем использовании. Ответ на этот вопрос зависит от решаемой задачи, в которой в качестве входного параметра будут использоваться данные о спектре нормализованной яркости света nLw или ее нормированном значении. Если говорить об отдельных СК, то максимальная абсолютная ошибка равна $\sim 0,2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ для случая 1 в СК 530 нм. В целом же интегральное значение спектра nLw от

400 до 700 нм приводит к относительной ошибке в диапазоне 5 – 10 % для рассматриваемых нами трех случаев.

Другой задачей может быть восстановление первичных гидрооптических характеристик, таких как коэффициенты поглощения света живой (a_{ph}) и неживой (a_{CDM}) органикой, коэффициент обратного рассеяния света взвесью (b_{pp}) и спектральные характеристики коэффициента поглощения света неживой органикой (S) и коэффициента обратного рассеяния света взвесью (n). То, что на рис. 8 во всех трех случаях нормированные спутниковые спектры nLw в диапазоне длин волн от 490 до 555 нм (а именно они используются для расчета a_{ph} и a_{CDM} в работах [24, 25]) близки к натурным данным, позволяет рассчитывать на удовлетворительное восстановление a_{ph} и a_{CDM} , несмотря на имеющиеся ошибки в виде «компенсационного» эффекта (рис. 7). В то же время вычисление спектральных характеристик S и n представляет определенные трудности, если не учитывать изменения спектрального хода параметра λ .

Выводы. Показано, что по основным оптическим характеристикам $\tau(870)$ и $\alpha(440 - 870)$ черноморский аэрозоль близок к континентальному. При значениях АОТ более 0,1 имеет место двухмодовый характер гистограммы λ , связанный, как показал анализ обратных траекторий воздушных масс, с разными районами генерации аэрозоля. Совместный анализ данных синхронных прямых и спутниковых измерений выявил наличие проблем корректного описания основных оптических параметров черноморского аэрозоля АОТ и λ набором аэрозольных моделей, которые используются при выполнении стандартной атмосферной коррекции [9]. Сопоставляя эти результаты с материалами работ [23] и [14], опубликованными в 2007 и 2009 гг. соответственно, можно сделать вывод о том, что текущая версия спутниковых данных обладает теми же недостатками. Показано, что для текущей версии атмосферной коррекции абсолютные значения спектра nLw оказались заниженными по сравнению с данными прямых измерений. Более близкий к наблюдаемому результат дает нормировка спектра nLw на его значение в СК 490 нм.

Работа выполнена в рамках научного проекта «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»), а также гранта РФФИ № 16-35-00179 «Исследование изменчивости оптических свойств атмосферы над Черным морем под воздействием пылевого аэрозоля пустыни Сахара». Авторы благодарят группу ученых проектов *AERONET*, *AERONET-OC* (см. табл. 1) и *NASA/GSFC/OBPG* за предоставленные данные и их предварительную обработку, а также рецензента за полезные советы и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/Site_Lists/aeronet_locations_2014_lev20.txt (дата обращения 25.10.2015 г.).
2. *Иванов А.П., Чайковский А.П., Зега Э.П. и др.* Мониторинг процессов переноса взвешенных в атмосфере частиц по данным дистанционных и локальных измерений в Беларуси и сопредельных регионах // *Збірник наукових статей III Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю.* – Вінниця, 2011. – Т. 2. – С. 362 – 365.
3. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В. и др.* Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // *Оптика атмосферы и океана.* – 2005. – 18, № 11. – С. 968 – 975.
4. *Улюмджиева Н.Н., Чубарова Н.Е., Смирнов А.Н.* Характеристики атмосферного аэрозоля в Москве по данным солнечного фотометра CIMEL // *Метеорология и гидрология.* – 2005. – № 1. – С. 48 – 57.
5. *Smirnov A., Holben B.N., Slutsker I. et al.* Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network // *J. Geophys. Res.* – 2009. – 114, № D06204. – doi:10.1029/2008JD011257.
6. *Feldman G.C., McClain C.R.* Ocean Color Web. – SeaWiFS Reprocessing 2010.0, MODIS-Terra Reprocessing 2013.0, MODIS-Aqua Reprocessing 2013.1, VIIRS-SNPP Reprocessing 2014.0. NASA Goddard Space Flight Center / Eds. N. Kuring, S.W. Bailey. – <http://ocean-color.gsfc.nasa.gov/> (Access October 2014).
7. *Сутнов С.А.* Спутниковый мониторинг содержания газовых примесей атмосферы и оптических характеристик атмосферного аэрозоля над европейской территорией России в апреле – сентябре 2010 г. // *Докл. РАН.* – 2011. – 437, № 1. – С. 102 – 107.
8. *Суслин В.В.* Учет атмосферных факторов при восстановлении спектрального коэффициента яркости открытого океана по дистанционным измерениям из космоса // *Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.* – Севастополь, 1992. – 20 с. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=15755135>.
9. *Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm // *Appl. Opt.* – 1994. – № 33. – P. 443 – 452.
10. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/atbd/rrs> (дата обращения 25.10.2015 г.).
11. *Phytoplankton Functional Types from Space / Ed. S. Sathyendranath* // *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group.* – Canada, Dartmouth. – 2014. – № 15. – 163 p.
12. *Session «Remote Sensing of Phytoplankton Composition – Possibilities, Applications and Future Needs»* // *Second International Ocean Colour Science Meeting (USA, San Francisco, 15 – 18 June, 2015).* – <http://iocs.ioccg.org/program/iocs-2015-presentations/>.
13. *Suslin V.V., Suetin V.S., Korolev S.N. et al.* Desert dust effects in the results of atmospheric correction of satellite sea color observations // *Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 4th Int. Conf. (Nizhny Novgorod, September 11 – 15, 2007).* – Nizhny Novgorod, 2007. – P. 184 – 187.
14. *Suslin V.V., Tolkachenko G.A., Cristina S.* Quality of the standard atmospheric products from the SeaWiFS and MODIS sensors over the Black and Mediterranean Seas // *Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 5th Int. Conf. (St. Petersburg, September 8 – 12, 2009).* – St. Petersburg, 2009. – P. 317 – 321.
15. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/reprocessing> (дата обращения 25.10.2015 г.).
16. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/version2_table.pdf (дата обращения 25.10.2015 г.).
17. *Schoeberl M.R., Newman P.A.* A multiple-level trajectory analysis of vortex filaments // *J. Geophys. Res.* – 1995. – 100, № D12. – P. 25801 – 25815.
18. *Pickering K.E., Thompson A.M., Kim H. et al.* Trace gas transport and scavenging in PEM-Tropics B South Pacific Convergence Zone convection // *Ibid.* – 2001. – 106, № D23. – P. 32591 – 32607.

19. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/VALIDATION/flags.html> (дата обращения 25.10.2015 г.).
20. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_one_station_seaprisim_new?site=Gloria&nachal=2&level=1&place_code=10 (дата обращения 25.10.2015 г.).
21. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_one_station_seaprisim_new?site=Galata_Platform&nachal=2&level=1&place_code=10 (дата обращения 25.10.2015 г.).
22. Калинин Д.В., Суслин В.В. Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – 8, № 1. – С. 59 – 67.
23. Kahn R.A., Garay M.J., Nelson D.L. et al. Satellite derived aerosol optical depth over dark water from MISR and MODIS: Comparisons with AERONET and implications for climatological studies // J. Geophys. Res. – 2007. – 112, № D18205. – doi: 10.1029/2006JD008175.
24. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Джулай А. и др. 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 и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – Вып. 28. – С. 303 – 319. – <http://blackseacolor.com/Site/Papers/suslinchurilova.pdf>.
25. Суслин В.В., Чурилова Т.Я. Трехканальный метод разделения поглощения света фитопланктоном и неживым органическим веществом: приложение к дистанционному зондированию в видимом диапазоне спектра // Тр. VIII Междунар. конф. «Современные проблемы оптики естественных вод» (ONW'2015) (Санкт-Петербург, 8 – 12 сентября 2015 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 199 – 203.

Optical features of the Black Sea aerosol and the sea water upper layer based on *in situ* and satellite measurements

V.V. Suslin*, V.K. Slabakova, D.V. Kalinskaya*, S.F. Pryakhina*,
N.I. Golovko***

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: slava.suslin@gmail.com

**Institute of Oceanology BAS, Varna, Bulgaria

Analyzed is the quality of reconstructing basic aerosol characteristics (the aerosol optical depth AOD and the Ångström parameter Å) and the water-leaving radiance spectrum (normalized water-leaving radiance nLw) resulted from application of standard atmospheric correction of satellite measurements data on the ascending over the Black Sea radiance obtained by the ocean color scanners *MODIS-Aqua/Terra* and *VIIRS-SNPP*. The analysis basis consists in the *in situ* measurements carried out at the *AERONET* and *AERONET-OC* stations synchronously with the satellite ones.

Joint analysis of simultaneous field and satellite measurements data reveals the problems in correct description of basic optical parameters of the Black Sea aerosol when the aerosol models are applied for standard atmospheric correction. A «compensation» effect (i.e. negative slope of the differences' relation within AOD and Å for *in situ* and satellite data) is demonstrated, and its influence upon quality of standard atmospheric correction is assessed. It is shown that for the current version of atmospheric correction, the absolute nLw values turn out to be understated as compared to the *in situ* measurements. The result closer to the *in situ* data can be obtained by normalizing the satellite-derived nLw spectrum on its value in the 490 nm band.

Keywords: *AERONET*, ocean color scanners, quality of atmospheric correction, Black Sea.