

УДК 551.46.08

© Г.А.Толкаченко¹, Д.В.Калинская¹, А.В.Смирнов², Ю.А.Прохоренко¹, 2012
ОАО «Камчатский гидрофизический институт», г.Виллючинск Камчатского края
tga_09@mail.ru

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБОВ АЭРОЗОЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НАД АКВАТОРИЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ

Приведены результаты исследований пространственной корреляции оптических неоднородностей атмосферы над Черным морем. Измерения проводились с помощью двух разнесенных в пространстве солнечных фотометров. Оценка пространственного радиуса корреляции полей аэрозоля составила около 160 км. При таком радиусе пространственной корреляции возможность правильной атмосферной коррекции по всей акватории Черного моря по результатам измерений оптических характеристик атмосферы в одной точке не представляется реальной. На конкретных примерах показана возможность обнаружения различных типов аэрозолей над морем с помощью портативных фотометров. Даны рекомендации по их использованию в подспутниковых экспериментах.

Ключевые слова: аэрозоль, атмосферная коррекция, пространственная корреляция, подспутниковый эксперимент.

Для решения широкого круга глобальных и региональных задач космического мониторинга Земли в видимом диапазоне спектра необходимы сведения об изменчивости оптических параметров атмосферы и подстилающей поверхности. Например, для решения задач аэрозольной климатологии по результатам наземных и космических измерений была получена надежная статистика пространственно-временной изменчивости оптических характеристик атмосферы над Европой [1]. Для оптимизации размещения наземной фотометрической сети AEROSIBNET в Западной Сибири на основе многолетних измерений из космоса была изучена статистика пространственно-временных вариаций аэрозольной оптической толщины (АОТ) и облачности [2].

При коррекции космических изображений от помех, вызванных влиянием атмосферы, необходим учет региональных особенностей оптических характеристиках атмосферного аэрозоля. Однако оптические параметры морской воды и атмосферного аэрозоля над водной поверхностью по результатам космических съемок часто определяются с недопустимо большими ошибками [3], поскольку закономерности формирования потоков восходящего излучения над сушей и морем, фиксируемых на спутнике, существенно различаются.

Сложность определения оптических характеристик системы океан–атмосфера из космоса состоит в том, что сигнал на борту спутника формируется под влиянием многих факторов, действующих в водной толще, на морской поверхности и в атмосфере. К ним относятся такие, например, факторы, как вариации концентраций пигментов микроводорослей, растворенной органики и терригенной взвеси в морской воде, изменения отраженных от поверхности моря радиационных потоков под действием ветрового волнения, а также изменчивость показателей рассеяния и поглощения света на частицах аэрозолей в атмосфере. Максимальные погрешности коррекции атмосферы в видимом диапазоне спектра обычно наблюдаются при определении концентраций хлорофилла в морской воде на фоне атмосферных аэрозолей с высокими значениями показателя поглощения.

Более точно оптические характеристики атмосферы могут быть измерены с помощью наземных солнечных фотометров. В этом случае факторы, связанные с воздействи-

ем оптических характеристик морской поверхности и водной толщи, в формировании выходных сигналов наземных фотометров не участвуют, а присутствие в атмосфере поглощающих компонентов нетрудно определить при анализе спектральных характеристик аэрозоля. Однако анализ результатов наземных определений параметров аэрозолей часто бывает затруднен существенными пропусками измерений из-за облачности, особенно заметными в холодное время года [4]. Кроме того, остаются также неизвестными и региональные особенности пространственной статистической структуры поля оптических неоднородностей атмосферы, что не всегда позволяет распространять результаты наземных измерений параметров аэрозоля, выполненных в фиксированной точке Черного моря, на всю акваторию бассейна.

В настоящей работе предпринята попытка оценить радиус пространственной корреляции оптических неоднородностей атмосферы над Черным морем по результатам синхронных измерений спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы $\tau_a(\lambda)$ на фиксированных длинах волн λ с помощью двух наземных солнечных фотометров, разнесенных в пространстве. По смыслу радиус пространственной корреляции близок к среднему размеру оптических неоднородностей в атмосфере и характеризует расстояние, на котором вариации оптических параметров аэрозоля остаются взаимно зависимыми (коррелированными).

Аппаратура и методика измерений. Измерения оптических характеристик атмосферы над акваторией Черного моря выполнялись двумя наземными солнечными фотометрами из объединенной автоматизированной сети изучения аэрозоля AERONET (AErosol RObotic NETwork). Сеть находится под управлением Центра космических полетов им. Годдарда (GSFC) Национальной Администрации по Аэронавтике и Космическим исследованиям NASA (США) и Лаборатории атмосферной оптики Университета наук и технологий г. Лилль (Франция).

Один из фотометров CIMEL-318 (производство компании Cimel Electronique Paris, France) является автоматизированным спектрофотометром, способным автономно измерять радиационные потоки от Солнца и небосвода. Фотометр CIMEL-318 в 2006 г. был стационарно установлен в Севастополе на здании МГИ НАН Украины (станция Sevastopol сети AERONET). Особенности работы стационарного фотометра, его технические характеристики, а также методики калибровок и измерений подробно изложены в [5]. Краткое описание прибора и его основные метрологические характеристики приведены в [6].

Второй солнечный фотометр MICROTOPS II (производство Solar Light Company, Philadelphia, USA) является переносным прибором. Он был разработан специально для измерений оптических характеристик атмосферы в труднодоступных местах Земли, в том числе и в морских экспедициях. Для наших исследований переносной фотометр был предоставлен Сетью Морского Аэрозоля (Maritime Aerosol Network) [7], которая является составной частью сети AERONET.

Спектрофотометр MICROTOPS II выпускается в двух версиях: фотометр для определения спектральной аэрозольной оптической толщины $\tau_a(\lambda)$ и озонометр для измерений содержания озона в столбе атмосферы. Обе версии прибора построены по одной и той же схеме, имеют одинаковые габариты, вес, дизайн и отличаются лишь полосами пропускания интерференционных светофильтров и программным обеспечением. Подробное описание озонометра и теоретические основы его работы изложены в работе [8], поэтому здесь приводятся лишь краткое описание переносного фотометра и его основные метрологические характеристики.

Прибор имеет пять оптических коллиматоров с полным углом поля зрения 2.5° . Когда изображение солнца находится в центре прицела, все оптические каналы ориентируются непосредственно на солнечный диск. Каждый канал снабжен узкополосным интерференционным фильтром с полосой пропускания 10 нм и отдельным приемником, который вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный лучистой энергии, по-

павшей на фотоприемник. Значения АОТ определяются по закону Бугера–Ламберта–Бира. Содержание паров воды W в атмосфере определяется на основе измерений АОТ в полосе поглощения воды на длине волны $\lambda = 936$ нм и в спектральном окне $\lambda = 870$ нм, где поглощение парами воды отсутствует. Метрологические характеристики солнечных фотометров CIMEL-318 и MICROTOPS II приведены в табл.1.

Таблица 1

Метрологические характеристики фотометров CIMEL-318 и MICROTOPS II

Характеристика	CIMEL-318	MICROTOPS II
Номинальная длина волны измерительных каналов, нм	340, 380, 440, 500, 675, 870, 936, 1020	440, 500, 675, 870, 936
Полуширина спектральных окон, нм	10	10
Угол поля зрения, град.	1.2	2.5
Продолжительность серии измерений, с	8	10
Погрешность измерений, %	1.0	1.0–2.0

Спектральные участки измерений обоих фотометров совмещены, методики их калибровок одинаковы. Обработка результатов, полученных стационарными и переносными фотометрами, выполнялась по программе AERONET, Version 2. Таким образом, стандартизация технических характеристик фотометров, методов их калибровок и процедур обработки результатов гарантирует, что результаты измерений АОТ(λ) и W , полученные переносным фотометром MICROTOPS II, будут сопоставимы с результатами, полученными фотометром CIMEL-318.

Измерения оптических характеристик атмосферного аэрозоля выполнялись во время экспедиций в различных точках побережья Черного моря. В процессе измерений $\tau_a(\lambda)$ высота установки фотометра MICROTOPS II изменялась в пределах 3–17 м, а расчеты спектральных АОТ выполнялись для высоты 10 м. Поэтому поправки на изменение высоты установки переносного фотометра над уровнем моря не вводились. Сведения о времени измерений переносным фотометром MICROTOPS II, названия станций, расстояние от станции до стационарного фотометра CIMEL-318 и количество отобранных для анализа пар синхронных измерений обоими приборами приведены в табл.2.

Таблица 2

Информация о станциях, на которых проводились измерения АОТ переносным фотометром MICROTOPS II

Названия станций	Расстояние, км	Координаты		Период измерений	Количество измерений
		широта	долгота		
Севастополь	≤ 6	44.616°С	33.517°В	30.07.08 - 25.09.08	479
Батилиман	25	44.417	33.686	21.08.08 - 24.08.08	62
Кацивели	44	44.507	33.974	09.09.08 - 15.09.08	50
СОП (океанографическая платформа)	45	44.393	33.984	05.09.10 - 16.09.10	326
Керчь	244	45.281	36.457	22.07.08 - 24.07.08	42
Тузла (о.Тузла)	248	45.281	36.537	23.07.08 - 23.07.08	28
Бугаз (Днестровский лиман)	290	46.131	30.511	29.06.08 - 03.07.08	55

Наблюдения проводились в дневное время с интервалом между сериями измерений около 15 мин. Иногда процесс наблюдений прерывался из-за облачности. Корреляционные связи полей АОТ определялись по отобранным парам спектров $\tau_a(\lambda)$ в каналах с длинами волн λ , равными 440, 500, 675, и 870 нм. Подбирались близкие во времени результаты, у которых разность моментов измерений не превышала 10 мин. Наблюдения

вблизи стационарного фотометра проводились на пяти станциях, расположенных приблизительно равномерно по дуге окружности с радиусом 5–6 км относительно фотометра CIMEL 318. Положение станций измерений фотометром MICROTOPS II на побережье Черного моря и в Севастополе показано на рис.1.

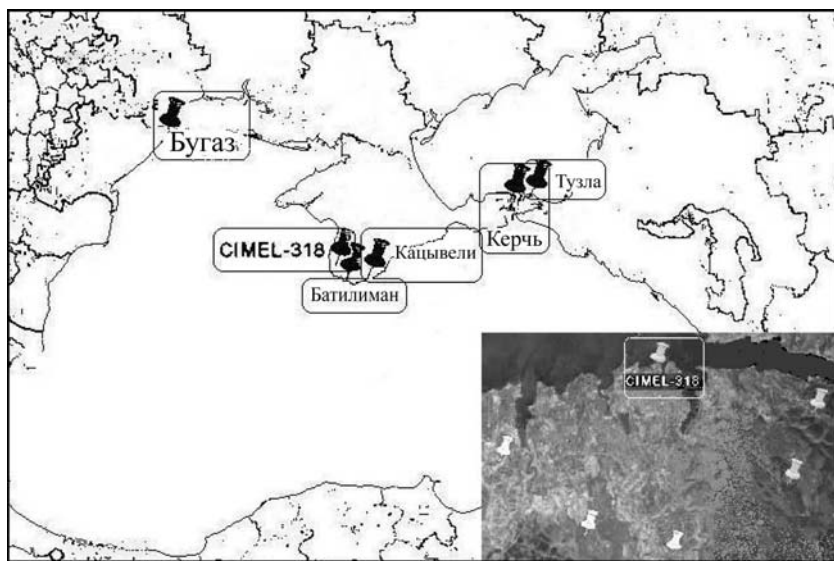


Рис.1. Размещение станций измерений солнечными фотометрами на побережье Черного моря.

На вставке – положение станций фотометра MICROTOPS II на расстояниях до 6 км от стационарного фотометра CIMEL-318.

По отобранным парам синхронных измерений фотометрами MICROTOPS II и CIMEL-318 для каждой из станций на основе регрессионного анализа рассчитывались коэффициенты корреляции АОТ. Регрессионная зависимость вариаций $\tau_a(500)$ для всех станций, расположенных в районе Севастополя, показана на рис.2, приведены уравнение регрессии и величина достоверности его аппроксимации (значение квадрата коэффициента корреляции).

Наиболее удаленная ст.Бугаз располагалась на узкой косе, отделяющей Днестровский лиман от Черного моря (расстояние от ст.Севастополь составляло 290 км). Результаты синхронных измерений АОТ двумя фотометрами в течение дня приведены на рис.3. Из рисунка видно, что в этот день над Бугазом значения аэрозольной оптической толщины плавно менялись от 0.1 утром до 0.14 в послеобеденное время. В утренние часы тенденция роста $\tau_a(500)$ наблюдалась и над Севастополем. Примерно в 7 ч по всемирному времени было замечено уменьшение $\tau_a(500)$, через 45 мин значения $\tau_a(500)$ понизились до величины 0.072, после чего снова наблюдался плавный рост АОТ.

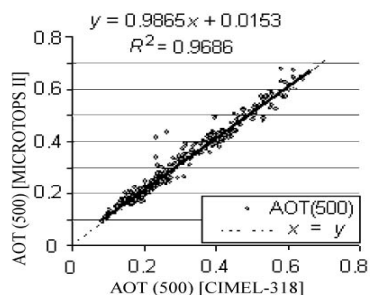


Рис.2. Сопоставление результатов измерений $\tau_a(500)$ фотометрами MICROTOPS II и CIMEL-318 в Севастополе.

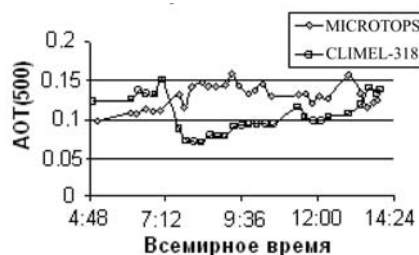


Рис.3. Изменения $\tau_a(500)$ в течение дня 3.07.2008 на ст.Севастополь – Бугаз при расстоянии между фотометрами $d = 290$ км.

Над Бугазом также наблюдался плавный рост $\tau_a(500)$ в утренние часы, а затем, после незначительного уменьшения мутности атмосферы, во второй половине дня значения АОТ изменялись слабо, а величина АОТ над Бугазом и Севастополем стала практически одинаковой. В течение дня содержание паров воды (W) и показатель Ангстрема

(α) здесь в основном не изменялись: W сохранились в пределах 2.5–2.8 см, а значения α по-прежнему оставались высокими (1.6–1.99).

Коэффициенты корреляции, полученные по регрессионным соотношениям для различных пунктов измерений, использовались для построения графика зависимости корреляционной функции $\tau_a(\lambda)$ от расстояний между фотометрами, после чего подбиралась аппроксимирующая их кривая. Удобной аппроксимацией пространственной функции корреляции оказалась предложенная в работе [2] экспонента $R(d) = \exp(-0.0043 d)$, где d – расстояние между фотометрами. Эта зависимость показана на рис.4. Поскольку при дистанционном зондировании биооптических полей морской воды основными поглощающими свет компонентами в системе океан–атмосфера являются атмосферные аэрозоли и пигменты микроводорослей, на этом же рисунке приведена для сравнения кривая пространственной корреляционной функции поверхностной концентрации хлорофилла в морской воде, полученная для центральной части Черного моря по модельным данным [9].

Из рис.4 видно, что оценки пространственных радиусов корреляции полей АОТ и концентрации хлорофилла на уровне $R(d) = 0.5$ хотя и различаются более чем в 2 раза, но являются величинами одного порядка и приблизительно равны 160 и 60 км соответственно.

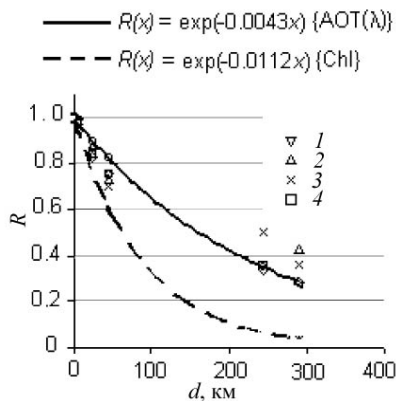


Рис.4. Пространственные функции корреляции $R(d)$ для аэрозольной оптической толщины атмосферы АОТ(λ) и концентрации хлорофилла Chl в поверхностном слое моря [9]. Длина волны λ , нм: 1 – 440, 2 – 500, 3 – 675, 4 – 870.

не учтены возможные сдвиги корреляций во времени для удаленных станций, не выявлено влияние анизотропии оптических полей на полученную оценку радиуса корреляции, да и количество использованных данных еще недостаточно велико.

Вместе с тем полученные результаты показывают, что по мере удаления от стационарно установленного фотометра CIMEL-318 оптические характеристики атмосферы заметно изменяются. Расстояния от стационарно установленного спектрофотометра (ст.Севастополь) до удаленных участков побережья Черного моря составляют около 500 км в западной части моря и до 750 км в восточной. Эти расстояния в 3–5.5 раз превышают полученную оценку радиуса пространственной корреляции 160 км. Приведенные цифры показывают, что вероятность корректного восстановления характеристик оптических аэрозолей по результатам пусть даже очень точных измерений параметров аэрозоля лишь в одной точке (ст.Севастополь) окажется недостаточно высокой, а возможность использования полученных результатов атмосферной коррекции для оценки биооптических характеристик моря не представляется реальной.

В подспутниковых экспериментах это положение можно исправить, используя результаты судовых измерений $\tau_a(\lambda)$ переносными солнечными фотометрами непосредст-

Физический смысл функции $R(d)$ – степень взаимной зависимости значений аэрозольной оптической толщины в двух точках, разделенных расстоянием d . Значение функции нормировано, т.е. ее максимум равен единице. Он достигается в точке $d = 0$ км и остается высоким при таких значениях d , на которых поле $\tau_a(500)$ изменяется незначительно (например, для станций, расположенных в Севастополе). Когда $R(d)$ убывает до величин, близких к нулю, это означает, что на таких расстояниях оптические свойства аэрозоля становятся взаимно независимыми. Расстояние, на котором корреляция заметно уменьшается, называется радиусом корреляции. Обычно его определяют как значение аргумента d , при котором $R(d) = 1/2$ или $1/e$.

Предварительные результаты и обсуждение. Полученные оценки пространственных масштабов оптических неоднородностей в атмосфере являются довольно грубыми, так как при расчетах

венно на океанографических станциях. Это позволит распространить полученные на станции значения оптических характеристик атмосферы на многие десятки километров от точки измерений и тем самым существенно уменьшить неопределенность валидации спутниковых изображений за счет более детальной коррекции атмосферных помех на акватории Черного моря.

Определенный интерес представляют результаты сопоставления пространственных корреляционных функций для регионов Черного моря и Западной Сибири [2], где были отмечены заметная азимутальная анизотропия аэрозольных полей и более крупные масштабы неоднородностей полей АОТ по сравнению с Черным морем. Характерные значения $R(d) \sim 0.5$ в Западной Сибири достигались на расстоянии $d = 300$ км, а по годам изменялись в широких пределах – от ~ 200 до ~ 800 км.

Пространственная анизотропия оптических характеристик аэрозолей предполагается и над Черным морем, но по результатам наших наблюдений не была обнаружена из-за малого количества синхронных измерений в различных азимутальных направлениях при значительных расстояниях между фотометрами.

Нижняя граница пространственного радиуса корреляции, полученная в Сибири, близка к полученной над Черным морем. Возможно, дальнейшие исследования в нашем регионе тоже расширят диапазон вариаций радиуса пространственной корреляции, но основной причиной различия полученных результатов является, по нашему мнению, масштаб усреднения используемых данных. В нашем случае осреднение по времени проводилось за период < 15 мин, а по пространству – на расстояниях < 0.2 км. В исследованиях пространственно-временной изменчивости АОТ Западной Сибири масштабы осреднения значений АОТ по времени составляли сезоны и годы, а осреднение по пространству проводилось с разрешением 56×62 км [2].

Определение типов аэрозолей по результатам наземных измерений АОТ(λ).

Атмосферная коррекция спутниковых данных при мониторинге биооптических характеристик морской воды может быть выполнена более точно с учетом особенностей спектральных характеристик ослабления солнечной радиации основными типами региональных аэрозолей [3, 10, 11]. Возможность распознавания региональных типов аэрозолей оценивалась по результатам измерений спектральных значений $\tau_a(\lambda)$ стационарным фотометром CIMEL-318 в Севастополе и переносным MICROTOPS II – на стационарной океанографической платформе. Платформа расположена на экспериментальном полигоне МГИ НАНУ на Южном Берегу Крыма (ЮБК) вблизи п.г.т. Кацивели на расстоянии 45 км от станции Севастополь [12]. Относительно небольшое расстояние между фотометрами (меньше радиуса пространственной корреляции) было выбрано для обеспечения возможности контроля оптических характеристик аэрозолей над платформой по результатам измерений микрофизических характеристик аэрозолей фотометром CIMEL-318 в Севастополе.

Идентификация типов аэрозолей над указанными станциями проводилась на основе анализа изменений во времени трех оптических характеристик атмосферы: аэрозольной оптической толщины $\tau_a(500)$, показателя Ангстрема $\alpha(440-870)$ на спектральном участке 440–870 нм и содержания паров воды W .

Основным преимуществом стационарного фотометра CIMEL-318 является возможность определения микрофизических характеристик аэрозолей за счет дополнительных измерений спектрального состава рассеянного небосводом света в альмукантарате Солнца. Инверсия полученных этим фотометром данных позволяет получить оценки целого ряда микрофизических характеристик аэрозолей, таких, например, как распределение частиц по размерам, спектральные значения комплексного показателя преломления, альbedo однократного рассеяния и др.

Результаты одновременных измерений $\tau_a(500)$, $\alpha(440-870)$ и W за период с 24 по 28 сентября 2010 г. над ЮБК и над Севастополем приведены на рис.5. Синхронность изме-

нений этих параметров во времени позволяет утверждать, что оба фотометра фиксировали воздушные массы с близкими оптическими характеристиками. Оценим возможность определения характеристик спектрального поглощения света по значениям $\tau_a(500)$ и $\alpha(440-870)$ и сравним полученные результаты с микрофизическими характеристиками аэрозолей над Севастополем. Примеры спектральных зависимостей $\tau_a(500)$ для аэрозолей горящей биомассы (24 сентября) и пыли пустынь Африки (27 сентября) приведены на рис.6.

24 сентября над Севастополем в течение дня атмосфера была довольно прозрачной: $\tau_a(500) \sim 0.1-0.13$, высокие значения показателя Ангстрема – $\alpha(440-870) \sim 1.74-1.50$ и малое содержание паров воды в столбе атмосферы – $W \sim 1.3-1.43$. В 13:50 всемирного времени значения показателя Ангстрема резко уменьшились до $\alpha(440-870) \sim 0.89-0.10$ при незначительном помутнении атмосферы – $\tau_a(500) \sim 0.10-0.19$. Спектры $\tau_a(\lambda)$ для этих ситуаций показаны на рис.6, а

(верхние кривые). Анализ семидневных обратных траекторий показал, что воздушные массы на высотах от поверхности до 5 км поступили со стороны Скандинавии через Западную Европу, Беларусь, Молдову и Украину. Наши наблюдения и анализ пространственно-временной изменчивости характеристик аэрозоля над Европой [1] показали, что в августе–сентябре с северных направлений в бассейн Черного моря поступают воздушные массы с доминированием аэрозолей тонкой моды, для которых характерны высокие значения показателя Ангстрема – $\alpha(440-870) > 1.5$.

Частицы этих аэрозолей являются продуктами сгорания биомассы (в основном лесные пожары, тление торфяников и сжигание отходов сельскохозяйственных производств) и содержат значительные количества черного углерода с высокими значениями действительной и мнимой компонент показателя преломления $m = n - ki$. Более высокие показатели Ангстрема характерны для очень малых частиц свежего дыма, а по мере старения аэрозоли частицы увеличиваются в размере и величины $\alpha(440-870)$ уменьшаются. Спектральный ход мнимой компоненты, характеризующей поглощение света аэрозолями этого типа, обычно показывает увеличение значений $k(\lambda)$ с ростом длины волны и уменьшение альбедо однократного рассеяния $\omega_o(\lambda)$ в длинноволновой части спектра. Резкое уменьшение показателя Ангстрема в конце дня свидетельствует об изменениях функции распределения частиц по размерам в сторону доминирования в столбе атмо-

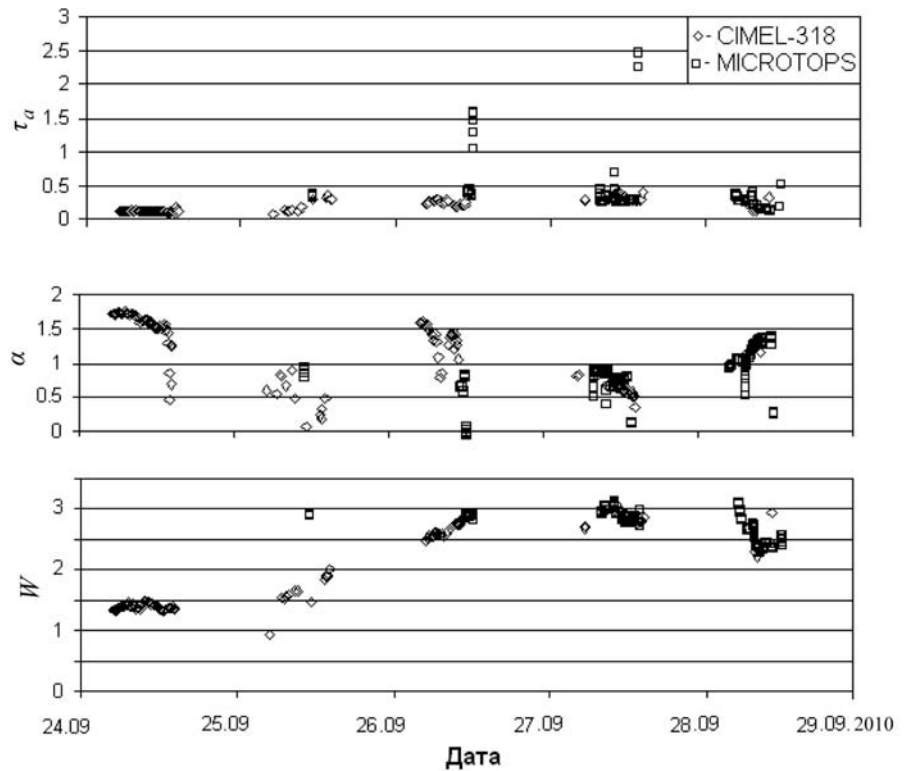


Рис.5. Результаты совместных измерений фотометрами CIMEL-318 над Севастополем и над ЮБК $\tau_a(500)$, $\alpha(440-870)$ и W в столбе атмосферы за период с 24 по 28 сентября 2010 г.

сферы частиц грубодисперсных частиц. Измерения фотометром MICROTOPS II в этот день не проводились из-за сильной облачности.

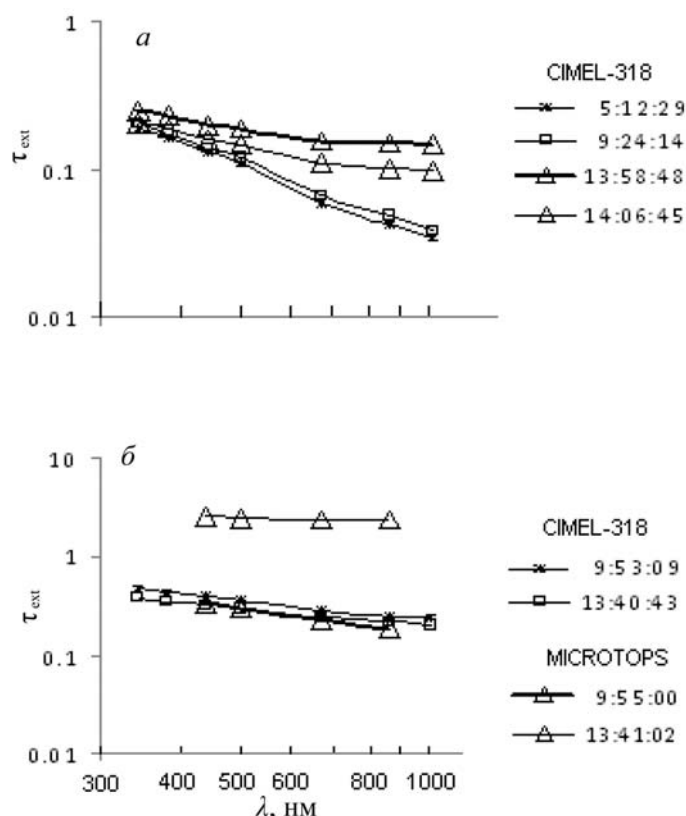


Рис.6. Примеры спектров $\tau_a(\lambda)$ основных типов региональных аэрозолей бассейна Черного моря. а – аэрозоли дыма горящей биомассы (24.09.2010); б – пылевые аэрозоли пустынь Северной Африки (27.09.2010).

С 25 по 27 сентября над Севастополем и над ЮБК было отмечено преобладание в атмосфере частиц грубой моды в условиях относительно чистой атмосферы ($\tau_a(500) < 0.5$) с характерными для пылевых аэрозолей пустыни Сахара значениями показателя Ангстрема $\alpha(440-870) < 1.0$. Анализ семидневных обратных траекторий также показал в эти дни перенос воздушных масс с пустынь Северной Африки на высотах от 0.5 до 5 км.

Наиболее устойчивым поступление пыли пустынь в бассейн Черного моря было 27 сентября с 8:30 до 14:30 всемирного времени. Значения $\tau_a(500)$ над Севастополем в это время плавно колебались в пределах 0.29–0.39, а $\alpha(440-870)$ снижались от 0.82 до 0.5 с резким уменьшением до уровня 0.34 в конце дня. Над ЮБК за время от 7:50 до 13:00 среднее значение $\tau_a(500)$ составляло 0.29 при стандартном отклонении 0.05 и коэффициенте вариации 0.17. Для показателя Ангстрема эти параметра были равны 0.81, 0.09 и 0.11 соответственно. В 13:40 над

ЮБК началась пыльная буря, при которой $\tau_a(500)$ достигла уровня 2.46, а показатель Ангстрема уменьшился до 0.11. В Севастополе это облако пыли осталось незамеченным.

Многочисленные исследования, например [3, 4, 10, 11], показали, что аэрозоли с африканского континента часто характеризуются поглощением в синей области спектра. Из космоса это поглощение над морем по стандартным алгоритмам определения параметров атмосферы обнаружить невозможно, так как эффекты поглощения света в коротковолновом диапазоне спектра приписывают поглощению пигментами микроводорослей в водной толще. Это приводит к грубым ошибкам продуктов спутниковых измерений оптических характеристик как морской воды, так и атмосферы [11]. Спектральный ход $\tau_a(500)$ для облака пыли показан на рис.6, б (верхняя кривая).

Спектральные зависимости $\ln [\tau_a(\lambda)] = f[\ln(\lambda)]$ на рис.6 явно показывают, что наклоны индивидуальных спектров на отдельных участках спектра заметно изменяются. Отрицательное значение этого наклона называется показателем Ангстрема $\alpha(\lambda_i - \lambda_j)$ для спектральных участков, ограниченных длинами волн λ_i и λ_j . Поскольку показатель Ангстрема определяется распределением частиц аэрозоля по размерам и комплексным показателям преломления, его значения могут быть использованы для распознавания отдельных типов аэрозолей [13]. Общая аэрозольная оптическая глубина, или оптическая глубина ослабления $\tau_{ext}(\lambda)$, может быть записана как

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{ext}}(\lambda) = \tau_{\text{sct}}(\lambda) + \tau_{\text{abs}}(\lambda),$$

где $\tau_{\text{sct}}(\lambda)$ – оптическая глубина рассеяния и $\tau_{\text{abs}}(\lambda)$ – оптическая глубина поглощения.

Спектральное альbedo однократного рассеяния $\omega_o(\lambda)$ является одним из микрофизических параметров, который может быть получен путем инверсии данных о значениях $\tau_a(\lambda)$ и спектральной яркости небосвода в альмукантарате Солнца по результатам измерений фотометром CIMEL-318 [14]. Этот параметр определяется выражением $\omega_o(\lambda) = \tau_{\text{sct}}(\lambda) / \tau_{\text{ext}}(\lambda)$ и служит удобной характеристикой для оценки влияния поглощения на общее ослабление света.

Спектральные характеристики $\omega_o(\lambda)$ для экстремальных и промежуточных значений $\tau_a(\lambda)$ и $\alpha(440-870)$ для аэрозолей горячей биомассы и пыли пустынь приведены на рис.7. Из рисунка явно видны отличительные черты $\omega_o(\lambda)$ для основных типов региональных аэрозолей: для аэрозолей свежего дыма горячей биомассы характерны уменьшение значений ω_o с ростом длины волны, высокие величины показателя Ангстрема (в распределении частиц по размерам доминирует мелкодисперсная мода) и большие значения мнимой части показателя преломления, спектральный ход которой стремится к уменьшению в коротковолновой области спектра. В процессе старения аэрозолей дыма происходит трансформация частиц, которая чаще всего приводит к их росту. В результате этого распределение частиц по размерам заметно преобразуется в сторону преобладания частиц грубой моды. Такая ситуация наблюдалась в конце дня 24 сентября, когда началось резкое уменьшение показателя Ангстрема (нижние кривые на рис.7). Минимальное в этот день значение $\alpha(440-870) = 0.465$ было зарегистрировано в 13:58:48 при $\tau_a(500) = 0.189$ и показателе преломления $m = 1.6 - k(\lambda)i$. Мнимые части m увеличивались с ростом длины волны от $k(440) = 0.0864$ до $k(1020) = 0.125$. Высокие значения n и k , а также спектральный ход $k(\lambda)$ и $\omega_o(\lambda)$ позволяют отнести эти частицы к очень старым аэрозолям горячей биомассы, несмотря на низкие значения показателя Ангстрема, больше характерные для почвенных аэрозолей.

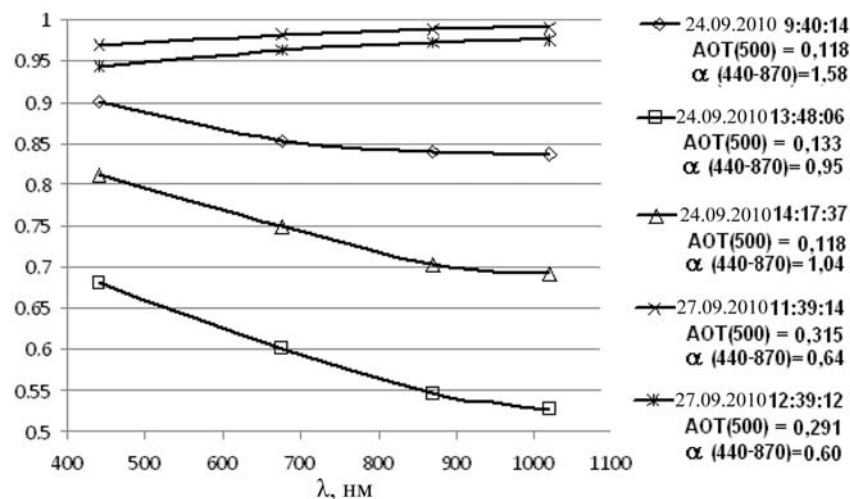


Рис.7. Спектры альbedo однократного рассеяния пыли пустынь из Северной Африки (две верхние кривые) и типичные для августа–сентября спектры дыма горячей биомассы (три нижние кривые), полученные по результатам измерений $\tau_a(\lambda)$ и яркости небосвода в альмукантарате солнца фотометром CIMEL-318.

Справа – дата и время измерений, основные оптические характеристики аэрозолей.

Для пыли африканских пустынь типичны высокие значения $\omega_o(\lambda)$ с плавным ростом в длинноволновой области спектра (две верхние кривые на рис.7). При помутнении атмосферы показатель Ангстрема и альbedo однократного рассеяния уменьшаются, особенно в коротковолновой области спектра.

Использование сведений о микрофизических характеристиках аэрозолей, полученных по результатам измерений фотометром CIMEL-318 спектральных АОТ и рассеяния света небосводом, позволило существенно улучшить качество распознавания типов аэрозолей на небольших по сравнению с радиусом пространственной корреляции расстояниях от фотометра. При значительных удалениях от ст. Севастополь вероятность правильного распознавания типа аэрозоля существенно уменьшится. В подспутниковых экспериментах наземные измерения оптических характеристик атмосферного аэрозоля в удаленных от этой станции точках могут быть выполнены с помощью переносного фотометра, но фотометр MICROTOPS II характеристик рассеяния света не измеряет. Поэтому при получении дополнительной информации для распознавания типов аэрозолей использовались методы, основанные на анализе показателей Ангстрема для различных участков спектра, которые нетрудно рассчитать по данным о спектральных значениях АОТ(λ). В работе [13] показано, что главные черты распределения частиц аэрозолей по размерам могут быть восстановлены на основе второй производной спектрального хода $\tau_a(\lambda)$, а на основе гипотезы о бимодальном распределении частиц по размерам был предложен алгоритм определения фракционного состава тонкодисперсных частиц с использованием данных о значениях АОТ(λ) в спектральном диапазоне 340–1020 нм [15].

Измерения спектральных значений АОТ несложно выполнить переносными фотометрами в любой точке Черного моря. На основе результатов измерений $\tau_a(\lambda)$ в трех и более спектральных каналах можно получить информацию о распределении частиц аэрозолей по размерам [13, 15]. Сведения об оптических характеристиках основных типов региональных аэрозолей и статистике их вариаций могут существенно облегчить задачу их распознавания. Дополнительную помощь при этом можно получить при анализе доступной информации о возможных источниках аэрозолей и основных траекториях их переноса.

Исследования статистической структуры поля $\tau_a(\lambda)$ над Черным морем проводились двумя солнечными фотометрами – CIMEL-318 и MICROTOPS II – в различных точках побережья Черного моря. При этом расстояния между фотометрами изменялись в пределах 5–290 км. Измерения выполнялись в дневное время с интервалом между сериями около 15 мин.

Корреляционные связи значений АОТ определялись по отобранным парам спектров АОТ в каналах с длинами волн λ , равными 440, 500, 675 и 870 нм. Критерием отбора служила совместимость во времени измерений фотометрами. Подбирались близкие результаты, у которых разность моментов измерений не превышала 10 мин. По отобранным парам синхронных измерений указанными фотометрами для каждой из станций на основе регрессионного анализа рассчитывались коэффициенты корреляции $\tau_a(\lambda)$.

Наиболее удобной аппроксимацией пространственной функции корреляции для $\lambda=500$ нм оказалась экспонента $R(d) = \exp(-0.0043d)$. Полученные оценки радиуса пространственной корреляции полей $\tau_a(\lambda)$ на уровне $R(d) = 0.5$ приблизительно равны 160 км.

При расстоянии от стационарного фотометра до наиболее удаленных участков побережья Черного моря, в 3–5.5 раз превышающем полученный радиус пространственной корреляции $R(x) = 160$ км, вероятность корректного восстановления оптических характеристик по результатам измерений параметров аэрозоля лишь в одной точке оказывается чрезвычайно низкой. Поэтому возможность использования полученных характеристик атмосферы для оценки биооптических характеристик на всей акватории моря не представляется реальной.

Для уменьшения неопределенности валидации космических снимков в подспутниковых экспериментах предложено использовать результаты судовых измерений $\tau_a(\lambda)$ переносными солнечными фотометрами непосредственно на океанографических станциях и за счет

более детального учета атмосферных помех повысить качество коррекции влияния атмосферы и уменьшить неопределенность определения оптико-биологических характеристик моря.

Приведены конкретные примеры определения аномальных оптических параметров аэрозолей горящей биомассы и почвенных аэрозолей из пустынь Северной Африки на акваторию Черного моря.

Авторы выражают искреннюю признательность руководителю программы AERONET доктору Б.Н.Холбену и его исследовательской группе за многолетнюю поддержку исследований аэрозоля над Черным морем средствами сети AERONET.

Литература

1. Chubarova N.Y. Seasonal distribution of aerosol properties over Europe and their impact on UV irradiance // Atmos. Meas. Tech. Discuss., 2. 2009. P.1863–1899.
2. Афонин С.В., Белов В.В., Панченко М.В., Сакерин С.М., Энгель М.В. Корреляционный анализ пространственных полей аэрозольной оптической толщины на основе спутниковых данных MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.21, № 6. С.510–515.
3. Суетин В.С., Толкаченко Г.А., Королев С.Н., Кучерявый А.А. Оптические свойства аэрозолей и атмосферная коррекция спутниковых наблюдений Черного моря // Морской гидрофиз. журн. № 4. Севастополь: МГИ НАН Украины. 2012. (в печати).
4. Яковлева Д.В., Толкаченко Г.А. Исследование дневной изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над Черным морем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины. 2008. Вып.16. С.212–223.
5. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D. et al. AERONET – A Federal Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization // Remote Sens. Environ. 1998. 66: P.1–16.
6. Толкаченко Г.А., Holben B.N., Лу М.Е., Коротаев Г.К. Автоматизированная система контроля параметров атмосферы // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. С.24–32.
7. Smirnov A.B., Holben B.N., Slutsker I., Giles D.M., McClain C.R., Eck T.F., Sakerin S.M., Macke A., Croot P., Zibordi G., Quinn P.K., Sciare J., Kinne S., Harvey M., Smyth T.J., Piketh S., Zielinski T., Proshutinsky A., Goes J.I., Nelson N.B., Larouche P., Radionov V.F., Goloub P., Krishna Moorthy K., Matarrese R., Robertson E.J., Jourdin F. Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, D06204, doi:10.1029/2008JD011257, 2009.
8. Morys M., Mims III F.M., Hagerup S., Anderson S.E., Backer A., Kia J., Walkup T. Design, calibration and performance of Microtops II handheld ozone monitor and sun photometer // J. Geophys. Res. 2001. V.106. P.14.573–14.582.
9. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Суетин В.С., Сухих Л.И. Ассимиляция спутниковых изображений цвета моря в междисциплинарной модели экосистемы Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины. 2008. Вып.16. С.323–332.
10. Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А. Проявление пылевого аэрозоля в результатах оптических наблюдений Черного моря из космоса // Там же. С.202–211.
11. Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А. Проявление особенностей свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофиз. журн. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. № 1. С.69–79.
12. Лу М.Е., Толкаченко Г.А., Маньковский В.И., Шибанов Е.Б., Мартынов О.В., Корчемкина Е.Н. Подспутниковые гидрооптические исследования на океанографической платформе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. «К 30-летию океанографической платформы в Кацивели» / НАН Украины: МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ. Севастополь, 2010, вып.21. С.35–53.
13. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols // J. Geophys. Res. 1999. V.104, N D24. P.31.333–31.349.
14. Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. 2002. Vol. 59. P.590–608.
15. O'Neill N.T., Eck T.F., Smirnov A., Holben B.N., Thulasiraman S. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth // J. Geophys. Res. 2003. V.108, N D17, 4559, doi:10.1029/2002JD002975.

