

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБОВ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ АЭРОЗОЛЯ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ

Г.А. Толкаченко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: tolkachenko_geor@mail.ru

Приведены результаты исследований пространственной корреляции оптических неоднородностей атмосферы над Черным морем. Измерения аэрозольной оптической толщины проводились с помощью двух разнесенных в пространстве солнечных фотометров. Оценка радиуса корреляции аэрозольной оптической толщины составила около 160 км. На конкретном примере показана возможность обнаружения поглощающих аэрозолей над морем и даны рекомендации по использованию переносных фотометров в подспутниковых экспериментах

Введение. При определении биооптических характеристик морской воды по космическим изображениям необходимо решать задачу атмосферной коррекции по измеренным со спутника оптическим характеристикам атмосферы. Сложность определения этих характеристик из космоса состоит в том, что сигнал на борту спутника формируется под влиянием многих факторов, действующих в водной толще, на поверхности моря и в атмосфере. К ним относятся такие, например, процессы, как изменения концентраций пигментов микроводорослей, растворенной органики и терригенной взвеси в морской воде, вариации отражения солнечных лучей на поверхности моря, а также рассеяние и поглощение света на частицах аэрозолей в атмосфере. Максимальные погрешности коррекции атмосферы обычно наблюдаются при определении концентраций хлорофилла на фоне аэрозоля с высоким показателем поглощения в коротковолновой области спектра.

Более точно оптические характеристики атмосферы могут быть измерены с поверхности Земли с помощью солнечных фотометров, поскольку факторы,

связанные с влиянием оптических характеристик морской поверхности и водной толщи в формировании выходных сигналов наземных фотометров не участвуют. При этом наличие в атмосфере поглощающих компонентов можно определить при анализе спектральных характеристик и микрофизических параметров аэрозоля. Однако, наземные измерения имеют существенные пропуски во времени, вызванные облаками и временем суток, особенно заметные в холодное время года [1]. Кроме того, остаются неизвестными также и региональные особенности пространственной статистической структуры поля оптических неоднородностей атмосферы, что не позволяет распространять результаты наземных измерений оптических характеристик атмосферы в фиксированной точке Черного моря на всю акваторию бассейна.

В настоящей работе предпринята попытка оценить радиус пространственной корреляции оптических неоднородностей атмосферы по результатам синхронных измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы АОТ (λ) на фиксированных длинах волн λ с помощью двух солнечных фотометров, разнесенных в пространстве. Этот параметр близок по смыслу к среднему размеру оптических неоднородностей в атмосфере и характеризует расстояние, на котором вариации оптических параметров аэрозоля остаются взаимно зависимыми (скоррелированными).

Используемая аппаратура. Измерения оптических характеристик атмосферы над акваторией Черного моря выполнялись двумя солнечными фотометрами из объединенной сети автоматизированных фотометров для изучения аэрозоля AERONET [2]. Сеть находится под управлением Центра космических полетов им. Годдарда (GSFC) Национальной администрации авиации и космических исследований NASA (США) в сотрудничестве с Лабораторией атмосферной оптики Университета наук и технологий города Лилль (Франция).

Один из фотометров CIMEL-318 (производство компании Cimel Electronique Paris, France) является автоматизированным спектрофотометром, способным автономно производить измерения

радиационных потоков от Солнца и небосвода и передавать результаты измерений в Центр сбора информации. Этот фотометр был в 2006 г. стационарно установлен в Севастополе на здании МГИ НАН Украины (станция *Sevastopol* сети AERONET). Краткое описание прибора и его основные характеристики приведены в [3].

Второй солнечный фотометр MICROTUPS II (производство Solar Light Company, Philadelphia, U.S.A.) является относительно недорогим, портативным и удобным для использования прибором. Этот фотометр был разработан специально для измерений оптических характеристик атмосферы в труднодоступных районах Земли, в том числе и в морских экспедициях. Для наших исследований переносной фотометр был предоставлен Сетью Морского Аэрозоля (Maritime Aerosol Network), которая является составной частью сети AERONET.

Спектрофотометр MICROTUPS II выпускается в двух версиях: а) солнечный фотометр, предназначенный для определения аэрозольной оптической толщины (АОТ) и содержания паров воды (СПВ) в столбе атмосферы и б) озонометр, назначение которого – измерение содержания в атмосфере озона и СПВ. Обе версии прибора построены по одной и той же оптической схеме, имеют одинаковые габариты, вес, дизайн и отличаются лишь полосами пропускания интерференционных светофильтров и программным обеспечением. Подробное описание озонометра и теоретические основы его работы изложено в [4], поэтому здесь приводится лишь краткое описание 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 отдельными приемниками (фотодиодами), которые вырабатывают электрический ток, пропорциональный лучистой энергии, попавшей на фотоприемник.

Значения АОТ и СПВ определяются по закону Бугера-Ламберта-Бира. Для получения значений АОТ(λ) компонента оптической толщины, обусловленная молекулярным рассеянием, вычитается из полной оптической толщины. При этом учет изменений атмосферного давления производится с помощью встроенного датчика давления. Изменения АОТ из-за поглощения света газовыми компонентами атмосферы, как, например O_3 и NO_2 , не учитываются.

Содержание паров воды в атмосфере определяется на основе измерений АОТ в полосе поглощения воды 936 нм и в окне 870 нм, где поглощения парами воды отсутствует. В процессе вычислений АОТ и СПВ необходимые значения зенитных углов Солнца определяются по географическим координатам места и по времени измерений. Эти данные определяются с помощью GPS и автоматически вводятся в память фотометра.

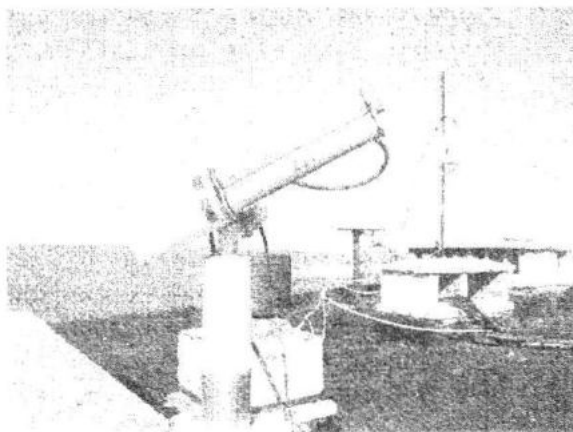
Метрологические характеристики солнечных фотометров CIMEL-318 и MICROTUPS II приведены в табл. 1.

Таблица 1
Метрологические характеристики солнечных спектрофотометров CIMEL-318 и MICROTUPS II

Характеристика	CIMEL-318	MICROTUPS II
Спектральные диапазоны измерений, 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	2,0
Продолжительность серии измерений, с	8	10
Погрешность измерений, %	1,0	1,0 ÷ 2,0

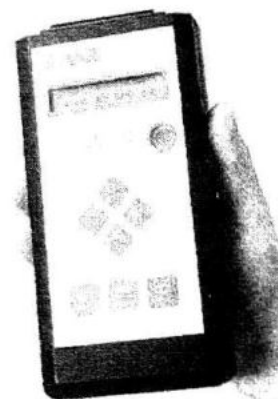
Спектральные участки фотометров на четырех длинах волн и в канале поглощения паров воды 936 нм совмещены. Методики калибровок обоих приборов одинаковы. Это гарантирует, что результаты измерений АОТ(λ), полученные переносным фотометром MICROTUPS II, будут сопоставимыми с результатами измерений фотометром

CIMEL-318. Внешний вид солнечных



а)

спектрофотометров показан на рис. 1.



б)

Р и с. 1. Солнечные спектрофотометры для измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля: а) спектрофотометр CIMEL-318 (стационарно установлен на здании МГИ НАНУ в Севастополе); б) переносной спектрофотометр MICROTOPS II (использовался для измерений АОТ(λ) с океанографической платформы и экспедиционных судов)

Методика измерений. Измерения оптических характеристик атмосферного аэрозоля проводились во время экспедиций в различные точки побережья Черного моря. Сведения о периодах измерений переносным фотометром MICROTOPS II на станциях, расстояниях от станций до стационарного фотометра CIMEL-318 и количества отображенных для анализа пар синхронных измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2
Информация о станциях, на которых проводились измерения АОТ переносным фотометром MICROTOPS II

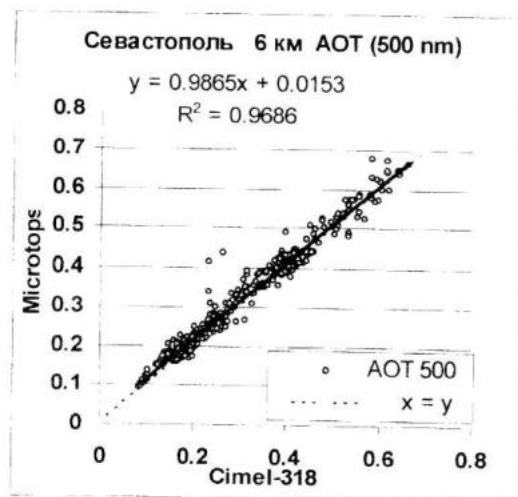
Станция	Удаленность, км	Период измерений	Кол-во измерений
Севастополь	6	30.07.08 - 25.09.08	479
Батилиман	25	21.08.08 - 24.08.08	62
ЭО МГИ	45	09.09.08 - 15.09.08	50
Коса Тузла	245	22.07.08 - 24.07.08	70
Бугаз	290	29.06.08 - 03.07.08	55

Измерения выполнялись в дневное время с интервалом между сериями около 15 мин. Иногда измерения прерывались из-за облачности. Корреляционные связи полей АОТ и СПВ определялись по отображенным парам спектров

АОТ в каналах с длинами волн λ , равными 440, 500, 675 и 870 нм. Критерием отбора служила совместимость во времени измерений фотометрами MICROTOPS II и CIMEL-318. Подбирались близкие во времени результаты, где разность моментов измерения не превышала 10 мин. Результаты сравнения измерений АОТ(500) обоими фотометрами на пяти станциях в Севастополе (удаление от CIMEL-318 - до 6 км) показаны на рис. 2.

Наиболее удаленная станция располагалась в районе Бугаза на узкой косе, отделяющей Днестровский лиман от Черного моря (удаление от Севастополя - 290 км). Пример вариаций АОТ(500) по результатам синхронных измерений 3.07.08 г. двумя фотометрами приведен на рис. 3. Из рисунка видно, что в этот день над Бугазом аэрозольная оптическая толщина плавно изменялась от значений 0.1 утром до 0.14 в послеобеденное время. В утренние часы тенденция роста АОТ(500) наблюдалась и над Севастополем. Примерно в 7 часов по всемирному времени фотометр CIMEL-318 зафиксировал уменьшение оптической толщины аэрозоля над городом и уже через 45 мин значения АОТ(500) понизились до величины 0.072. Затем снова наблюдался плавный рост АОТ и во второй половине дня после 13 часов 30 мин значения АОТ над Бугазом и над Севастополем

практически сравнялись. За это время содержание паров воды и показатель Ангстрема α над Севастополем и над Бугазом почти не изменялись - СПВ сохранялись в пределах 2.5 - 2.8 см, а значения α оставались высокими (1.6 - 1.99).



Р и с. 2. Сопоставление результатов измерений AOT(500) фотометрами MICROTOPS II и CIMEL-318, разнесенными на расстояния до 6 км



Р и с. 3. Пример синхронных измерений AOT(500) при максимальном расстоянии между фотометрами 290 км (станция Бугаз)

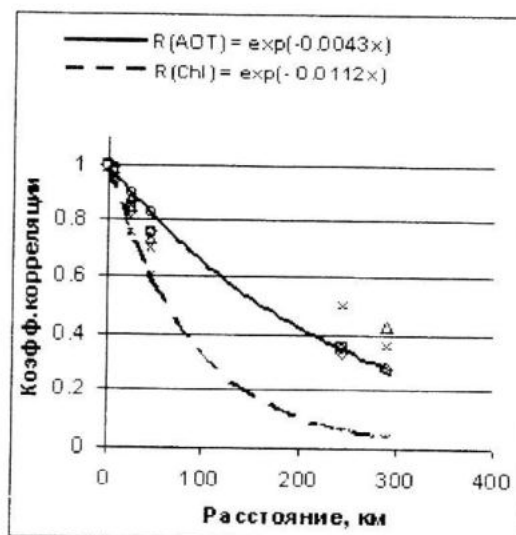
По отобранным парам синхронных измерений фотометрами MICROTOPS и CIMEL-318 для каждой из станций на основе регрессионного анализа рассчитывались коэффициенты корреляции AOT(λ). Регрессионная зависимость вариаций AOT(500) для станций, расположенных в районе Севастополя от результатов измерений этих же характеристик фотометром CIMEL-318 показана на рис. 2. На рисунке приведено уравнение регрессии и величина досто-

верности его аппроксимации (значение квадрата коэффициента корреляции). Полученные по регрессионным соотношениям для различных пунктов измерений коэффициенты корреляции использовались для построения графика пространственной корреляционной функции AOT(λ) от расстояния между фотометрами, после чего подбиралась аппроксимирующая их кривая.

Наиболее близкой аппроксимацией пространственной корреляционной функции, полученной по результатам наших измерений, оказалась экспонента

$$R(\text{AOT}) = \exp(-0.0043 \cdot x),$$

где x – расстояние между фотометрами. Эта аппроксимация показана на рис. 4. Поскольку при дистанционном зондировании био-оптических полей морской воды основными поглощающими свет компонентами в системе океан-атмосфера являются атмосферные аэрозоли и пигменты микроводорослей, на этом же рисунке приведена аппроксимация пространственной корреляционной функции поверхностной концентрации хлорофилла в морской воде, полученная в [5] для центральной части Черного моря по модельным данным.



Р и с. 4. Пространственные функции корреляции аэрозольной оптической толщины и концентрации хлорофилла [5]

На рис. 4 видно, что оценки пространственных радиусов корреляции

полей АОТ(λ) и концентрации хлорофилла на уровне $R(x) = 0.5$ хотя и различаются более чем в два раза, но являются величинами одного порядка и приблизительно равны 160 км и 60 км, соответственно.

Физический смысл функции $R(\text{АОТ})$ - степень взаимной зависимости значений аэрозольной оптической толщины в двух точках, разделённых расстоянием x . Значение функции нормировано, то есть, её максимум равен единице. Этот максимум достигается в точке $x = 0$ и остается высоким при таких значениях x , на которых поле АОТ изменяется незначительно (станции, расположенные в районе Севастополя). Когда значение R убывает до величин, близких к нулю, это означает, что на таких расстояниях оптические свойства аэрозоля становятся взаимно независимыми. Расстояние, на котором корреляция существенно уменьшается, называется радиусом корреляции. Обычно его определяют как значение аргумента x , при котором $R(x) = 1/2$ или $1/e$.

Предварительные результаты. Полученные оценки пространственных масштабов оптических неоднородностей в атмосфере являются довольно грубыми, т.к. при расчетах не учитывались возможные для удаленных станций сдвиги корреляций во времени, не выявлено влияние анизотропии оптических полей на полученную оценку радиуса корреляции, да и количество использованных реализаций невелико.

Вместе с тем, полученные результаты показывают, что по мере удаления от стационарно установленного фотометра CIMEL-318, оптические характеристики атмосферы успевают заметно измениться. Это обстоятельство не позволяет ожидать положительных результатов коррекции влияния атмосферы над всей акваторией моря по результатам измерения параметров атмосферы на станции *Sevastopol* сети AERONET.

В подспутниковых экспериментах это положение можно исправить, используя результаты измерений АОТ(λ) переносными солнечными фотометрами непосредственно на океанографических станциях. Это позволит распространить полученные на станциях значения опти-

ческих характеристик атмосферы на многие десятки километров от точки измерений и, тем самым, существенно повысить информативность экспедиционных работ за счет более качественной коррекции атмосферных помех при валидации продуктов съемки морской поверхности космическими сканерами цвета.

Возможность обнаружения поглощающих аэрозолей над океанографической платформой (контрольно-калибровочный полигон ЭО МГИ на Южном Берегу Крыма) была проверена по результатам измерений параметров атмосферы стационарным фотометром в Севастополе и переносным – на океанографической платформе в 2010 г. Аппаратура и методика измерений были те же, что и в 2008 году.

Во время измерений с 26 по 28 сентября удалось зафиксировать ситуацию вторжения в воздушный бассейн Черного моря пылевых аэрозолей из пустынь на севере Африки, которые с 25 по 28 сентября 2010 г. (по данным анализа семидневных обратных траекторий) переносились к берегам Крыма на высотах 3 – 5 км. Многочисленные исследования, например [6], показали, что аэрозоли с африканского континента часто характеризуются поглощением в синей области спектра. Из космоса это поглощение по стандартным алгоритмам определения параметров атмосферы обнаружить невозможно. В результате, факт поглощения света в коротковолновом диапазоне видимой области спектра обычно приписывают поглощению пигментами микроводорослей в водной толще, и получают грубые ошибки продуктов спутниковых измерений оптических характеристик, как в атмосфере, так и в воде.

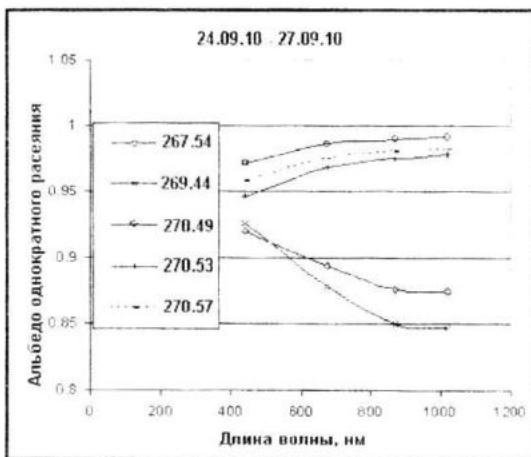
Удобным параметром для оценки роли поглощения в общем ослаблении света является спектральное альбедо однократного рассеяния $\omega_o(\lambda)$. Этот параметр определяется как

$$\omega_o(\lambda) = \tau_{\text{scat}}(\lambda) / [\tau_{\text{abs}}(\lambda) + \tau_{\text{scat}}(\lambda)],$$

где $\tau_{\text{abs}}(\lambda)$ - спектральный показатель поглощения и $\tau_{\text{scat}}(\lambda)$ - показатель рассеяния света. Вариации $\omega_o(\lambda)$ во время пыльной бури у берегов Крыма показав-

ны на рис. 5. Три верхних спектра на этом рисунке убедительно показывают влияние поглощения в синей области спектра. Нижние кривые – типичные спектры ω_0 для почвенных аэрозолей.

Поскольку спектральные аномалии АОТ(λ) могут быть обнаружены по наземным измерениям АОТ(λ), их, после обнаружения, можно либо учитывать при коррекции атмосферных искажений, либо отбраковывать при оценке био-оптических параметров морской воды.



Р и с. 5. Спектры альбедо однократного рассеяния почвенного аэрозоля из пустынь северной Африки. В легенде указано время измерений, измеренное в количестве дней от начала года.

Заключение. Полученные результаты показали несомненную пользу при использовании переносных солнечных фотометров для определения региональных особенностей оптических характеристик атмосферы. Для пополнения базы данных о региональных параметрах атмосферы можно рекомендовать повсеместно использовать эти фотометры в практике подспутниковых экспериментов и при проведении попутных гидрометеорологических наблюдениях на коммерческих судах.

Автор выражает искреннюю признательность руководителю программы AERONET доктору Б. Холбену и его исследовательской группе за содействие в безотказной работе на Черном

море фотометров CIMEL-318 и руководителю сети морского аэрозоля доктору А. Смирнову за постоянное внимание и поддержку исследований аэрозоля над Черным морем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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: 1 – 16.
3. Толкаченко Г.А., Holben B.N., Ли, М.Е. Коротаев Г.К. // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. - С. 24 – 32.
4. Morys, M., Mims III, F. M., Hagerup, S., Anderson, S. E., Backer, A., Kia, J. and Walkup, T. Design, calibration and performance of Microtops II hand-held ozone monitor and sun photometer. J. Geophys. Res., 2001, 106, 14,573 – 14,582.
5. 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.
6. Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А. Проявление пылевого аэрозоля в результатах оптических наблюдений Черного моря из космоса // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. - Вып. 16. С. 202 - 211.