

Е.Б.Шибанов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЯ НАД МОРЕМ

Рассмотрен статистически неравновесный процесс генерации и трансформации атмосферного аэрозоля над морем. Выявлена причина высоких значений коэффициентов корреляции между значениями аэрозольной оптической толщины в видимом диапазоне. Объяснен механизм образования бимодального распределения частиц по размерам. Показано, что для параметризации оптических свойств аэрозоля требуется по крайней мере одна степень свободы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *атмосферный аэрозоль, оптические свойства, рассеяние света, неравновесные процессы, функция распределения по размерам, атмосферная коррекция.*

Большинство процессов, происходящих в естественных средах, находятся вдали от термодинамического равновесия. В открытых системах происходит обмен энергией или веществом с окружающим пространством, вследствие чего появляются корреляция в поведении различных элементов системы. Перечислим некоторые признаки статистически неравновесных систем.

- зависимость макроскопических переменных (давление, температура и т.д.) от координат и времени;
- возникновение качественно новых закономерностей эволюции системы;
- сокращение размерности хаоса и, как следствие, чувствительность системы к малым возмущениям;
- разделение процессов, происходящих в системе, на более быстрые и медленные процессы;
- образование особых направлений в пространстве, где обмен энергией и веществом происходит быстрее;
- зависимость макроскопических величин от способа осреднения по пространству или времени.

Теоретический анализ статистически неравновесных систем существенно затрудняется.

В работе рассмотрен статистически неравновесный процесс генерации и трансформации атмосферного аэрозоля над морем в условиях ясной погоды, влияющий на пространственно-временную изменчивость его оптических свойств. Целью исследования являлось объяснение проблемы атмосферной коррекции в задаче дистанционного зондирования цвета моря.

Особенности аэрозольной оптической толщины (АОТ) над Черным морем в безоблачных условиях. Атмосферный аэрозоль, как мешающий фактор при дистанционном зондировании цвета моря, вносит существенный вклад в суммарную яркость на верхней границе атмосферы. Стандартные методы используют инфракрасные каналы для атмосферной коррекции [1].

Последующая модельная экстраполяция значения атмосферной дымки в видимую область может приводить к большим ошибкам в последующем определении коэффициента яркости в коротковолновой области. Концентрации хлорофилла, восстановленные по таким спектрам коэффициента яркости, часто оказываются завышенными, особенно в прибрежных водах [2].

В [3] анализировались данные многолетних измерений, выполненных в Карадагской метеорологической обсерватории штатным солнечным фотометром М-83. Анализ показал, что статистические характеристики АОТ над Черным морем описываются простой однопараметрической моделью, причем спектральная функция средней АОТ практически пропорциональна первому собственному вектору [3]. Однако если бы однопараметрическое представление АОТ было бы корректным, то ошибки атмосферной коррекции в коротковолновой области спектра были бы случайными. Автором было высказано предположение, что высокие коэффициенты корреляции АОТ на разных длинах волн обусловлены условием безоблачности. В [4] было показано, что если облачность прерывает измерения в середине дня, а также наблюдается утром или вечером, то уравнения регрессии между АОТ(340 нм) и АОТ(670 нм) существенно отличаются друг от друга и от уравнения регрессии, построенного для безоблачного дня (рис.1).

Изменения оптических свойств аэрозоля с ростом относительной влажности обусловлены присутствием растворимой фракции взвешенных в атмосфере частиц. Дадим качественное объяснение физического механизма трансформации аэрозоля. Пусть солевая частица радиусом r находится в воздухе, имеющем относительную влажность η . Тогда если η превышает некоторое критическое значение η_{cr} , зависящее от химической природы растворимого вещества, то функция $r(\eta)$ описывается законом Рауля-Томсона (рис 2). При $\eta > 100\% \ r \rightarrow \infty$, при $\eta < \eta_{cr}$ раствор высыхает до размеров ядра. Но это в равновесных условиях. В сильно неравновесных условиях, при $\eta \ll \eta_{cr}$, вместо одного ядра образуется множество мелких [5]. $\eta(z)$ растет с высотой z , поэтому в безоблачных условиях $\eta(0) < \eta_{cr}$.

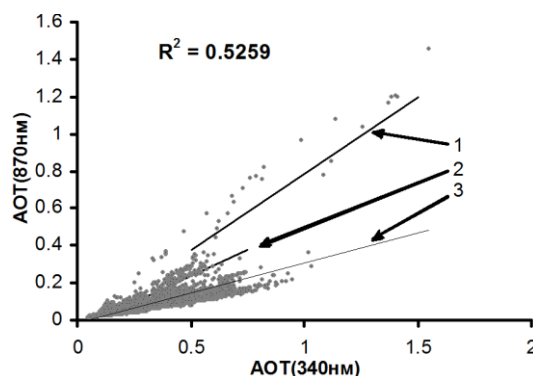
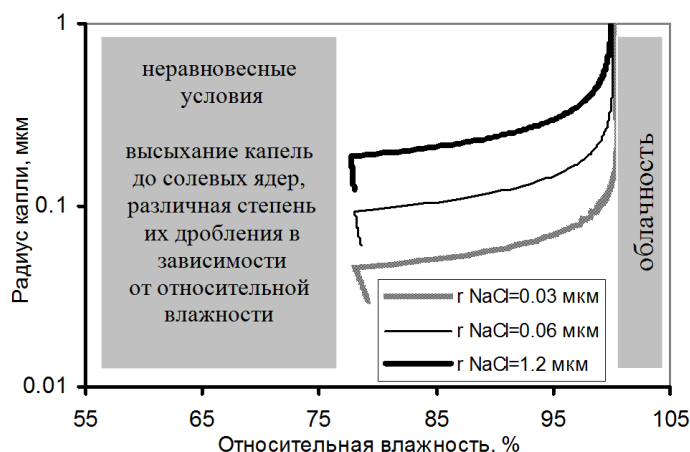


Рис.1. Изменение регрессионных зависимостей при наличии облачности в течении дня: в середине дня (1), в начале или конце (2), безоблачный день (3).

свойствами

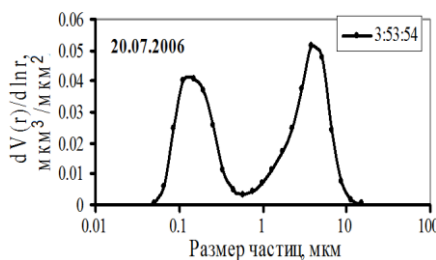
Следовательно, растворимое химическое вещество может присутствовать в атмосфере, как в виде ядер, так и в водном растворе. В итоге функция распределения частиц по размерам даже в однокомпонентном случае уже имеет бимодальный закон распределения. Соотношение между модами зависит от профиля относительной влажности и интенсивности турбулентного обмена, т.е. от метеорологических параметров. Отметим наличие прямой и обратной связи между оптическими



Р и с . 2 . Размер капли солевого раствора в зависимости от относительной влажности при разных размерах сухого ядра.

аэрозоля и радиационным балансом, зависящим от рассеяния и поглощения света аэрозольными частицами.

Начиная с мая 2006 г., в Морском гидрофизическом институте НАН Украины измерения оптических свойств аэрозоля проводятся с помощью многоканального прибора *Sun Photometer* фирмы *CIMEL* модели *CE-318* в рамках программы *AERONET*. Данный прибор позволяет измерять также аэрозольную индикатрису рассеяния. В результате обработки данных измерений, предусмотренные программой *AERONET*, можно получать микрофизические характеристики аэрозоля: альбедо однократного рассеяния и распределение частиц по размерам. На рис.3 дан пример функции распределения, имеющей две моды. Максимум функции распределения для крупных частиц приходится на радиусы близкие к размеру капель мелкого тумана, а также к значению радиуса частиц в максимуме распределения частиц по размерам капель облаков, т.е. 5 мкм. Функция $dV/d \ln r \sim r^4 dN/dr$, отложенная по оси Y, выбрана из тех соображений, чтобы ее значения для крупных и мелких частиц имели один порядок. Следует заметить, что преобладание «мелкой моды» характерно для безоблачных дней. Расчеты по теории Ми показали что, крупная мода влияет только на рассеяние в малых углах для безоблачных дней, составляющих основную часть массива данных, а первый собственный вектор АОТ, рассчитанный по всему массиву, определяется мелкими частицами. Действительно, если аппроксимировать первый собственный вектор АОТ моделью с лог-нормальной функцией распределения, то значения r для максимума функции $dV/d \ln r$ будут близки к положению максимума первой моды положению макси-



мума первой моды положению макси-

Р и с . 3 . Распределение аэрозольных частиц по размерам, полученное методом решения

обратной задачи по данным измерений *AERONET*.

мума первой моды. Так, для собственных векторов АОТ в Карадагской обсерватории за период с 1989 по 1992 гг. значения $r_{\max}$ варьировались в пределах от 0,15 до 0,21 мкм,

Несмотря на то, что основное влияние на оптические свойства аэрозоля оказывает мелкодисперсная мода, точность процедуры атмосферной коррекции по спектральным интервалам в ближней ИК области спектра будет недостаточно высокой для решения задачи дистанционного зондирования моря. Мода частиц, больших 1 мкм, влияет на угловой показатель рассеяния, причем степень влияния зависит от длины волны света. Допустим, что по измерениям яркости на верхней границе атмосферы можно получить оценку двух характеристик мелкодисперсной фракции и одной характеристики моды крупных частиц. Однако при уменьшении длины волны (например, с 870 до 412 нм) третий параметр функции распределения мелких частиц будет оказывать большее влияние на яркость рассеянного излучения, чем первый параметр функции распределения крупной фракции аэрозоля. Иными словами процедура экстраполяции оптических свойств аэрозоля обречена на неудачу. Еще в 1992 г был предложен способ повышения точности атмосферной коррекции, используя метод интерполяции [6]. При этом, достаточно иметь приближенную оценку величины коэффициента яркости моря на границе диапазона измерений в синей области спектра.

Выводы:

- высокая корреляция АОТ обусловлена условием безоблачности;
- основная изменчивость АОТ над Черным морем объясняется субмикронной фракцией аэрозольных частиц с узким распределением по размерам (от 0,01 до 1 мкм);
- индикатриса рассеяния определяется бимодальным распределением аэрозольных частиц по размерам в интервале от 0.01 до 10 мкм;
- такое распределение частиц по размерам может быть объяснено растворимостью аэрозоля. Следовательно, главными факторами, влияющими на оптические свойства аэрозоля, следует считать атмосферные характеристики, такие как, относительная влажность и ее профиль, высота слоя инверсии и профиль температуры;
- для параметризации оптической модели аэрозоля требуется по крайней мере одна степень свободы. Иными словами, число моделей с фиксированными параметрами функции распределения стремится к бесконечности;
- для улучшения результатов атмосферной коррекции необходимо иметь оценку величины коэффициента яркости моря в коротковолновой области видимого диапазона спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // *Appl. Optics.*– 1994.– v.33, № 3.– P.443-452.

2. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V. Evdoshenko M.A.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Res. II.*– 2004.– V.51.– P.1063-1091.
3. *Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Любарцев В.Г.* Спектральная прозрачность атмосферы над Черным морем. // *Морской гидрофизический журнал.*– 2000.– № 4.– С.46-68.
4. *Домнич М.Н., Шибанов Е.Б.* Исследование атмосферного аэрозоля над Черным морем в прибрежной зоне по результатам наземных измерений 1989-1990 гг. и 2006-2007 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– вып.17.– С.298-302.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика.– М.: Наука, 1979.- т.10.– 527 с.
6. *Паришков С.В., Ли М.Е.* Дистанционное зондирование оптически активных примесей с применением коротковолнового участка спектра // *Автоматизированные системы контроля состояния морской среды.*– Севастополь: МГИ НАН Украины, 1992.– С.65-78.

Материал поступил в редакцию 27.10.2010 г.