УДК 681.5

# ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИНАРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

**Цымбаревич Е.Г.**
**Могилевский государственный университет продовольствия**
**г. Могилев, Беларусь**

Реальные природные образования (атмосфера, океан, подстилающая поверхность земли, биологические структуры), а также многие разновидности продукции промышленного производства (ткани, полимерные изделия) имеют ярко выраженную стохастическую структуру. В частности, их оптические свойства обладают нерегулярной изменчивостью и ярко выраженной анизотропией при распространении в таких структурах излучения.

Корректное описание таких объектов требует адекватной математической модели и в настоящее время рассматривается в рамках статистической теории переноса. Основой этой теории является стохастическое уравнение переноса излучения:

$$LI\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)=0\,, \tag{1}$$

где $L$ – линейный стохастический оператор, описывающий влияние рассеивающей среды на проходящее излучение, $I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)$ – стохастическая яркость света в точке $\vec{r}$ пространства в направлении $\vec{\Omega}$,

$$L=\vec{\Omega}\cdot\nabla+\varepsilon\left(\vec{r}\right)-\frac{\sigma\left(\vec{r}\right)}{4\pi}\int\limits_{4\pi}d\vec{\Omega}'g\left(\vec{r};\vec{\Omega}\cdot\vec{\Omega}'\right)(\cdot),$$

$\nabla$ – оператор Гамильтона, $\varepsilon\left(\vec{r}\right)$, $\sigma\left(\vec{r}\right)$ – коэффициенты рассеяния и поглощения.

Невозможность получить решение уравнения (1) в замкнутой форме привела к необходимости разработки приближенных численных и аналитических методов решения стохастического уравнения переноса. Одним из таких методов является малоугловой итерационный алгоритм приближенного аналитического решения уравнения переноса, использующий новый подход в применении классической теории возмущений.

Разделяя оператор $L$ и яркость $I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)$ на среднюю и случайную составляющие

$$L=\left\langle L\right\rangle+\tilde{L}\,,\;\; I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)=\left\langle I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)\right\rangle+\tilde{I}\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right),$$

$$\left\langle L\right\rangle=\vec{\Omega}\cdot\nabla+\left\langle\varepsilon\right\rangle-\int\limits_{4\pi}d\vec{\Omega}'\left\langle\sigma\left(\vec{\Omega}\cdot\vec{\Omega}'\right)\right\rangle(\cdot),$$

$$\tilde{L}=\tilde{\varepsilon}\left(\vec{r}\right)-\int\limits_{4\pi}d\vec{\Omega}'\tilde{\sigma}\left(\vec{r};\vec{\Omega}\cdot\vec{\Omega}'\right)(\cdot),$$

из уравнения (1) находим

$$\langle L\rangle\left\langle I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)\right\rangle+\left\langle\tilde{L}\tilde{I}\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)\right\rangle=0. \quad (2)$$

Здесь символ "~" означает отклонение случайной величины от среднего значения, угловые скобки – знак математического усреднения.

Средняя яркость $\left\langle I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)\right\rangle$ в рамках метода итераций определится как решение вспомогательного уравнения, получаемого из (2) с помощью преобразований Фурье по пространственным и угловым координатам $\vec{r}$ и $\vec{\Omega}$:

$$\left\{\frac{\partial}{\partial z}-\Phi(\vec{p})\right\}\langle I(z;\vec{p})\rangle=\int_0^z K_n(z-z';\vec{p})\langle I(z';\vec{p})\rangle dz'. \quad (3)$$

Здесь $\Phi(\vec{p})=\langle\varepsilon\rangle-\langle\sigma\rangle g(|\vec{p}|)$, $\langle\varepsilon\rangle$ и $\langle\sigma\rangle$ – параметры среды (средние значения коэффициента экстинкции и показателя рассеяния), $g(|\vec{p}|)$ – преобразование Ганкеля от индикатрисы рассеяния среды, $\langle I(z;\vec{p})\rangle$ – фурье-спектр функции $\left\langle I\left(\vec{r};\vec{\Omega}\right)\right\rangle$, $K_n(z-z';\vec{p})$ – интегральное ядро уравнения (3), натуральный параметр $n$ – порядковый номер приближения метода итераций.

Уравнение (3) является замкнутым относительно $\langle I(z;\vec{p})\rangle$ и позволяет получить аналитическое решение в рамках бинарной модели светорассеивающей среды.

В данном докладе рассматривается бинарная модель стохастической среды в рамках которой оптические характеристики элементарного объема рассеивающего слоя определяются показателем ослабления $\varepsilon(z)$ и показателе рассеяния $\sigma(z)$, где $z$ – глубина светорассеивающего слоя в объеме среды. Эти функции имеют следующую структуру:

$$\varepsilon(z)=\varepsilon_1\chi_1(z)+\varepsilon_2\chi_2(z),\ \sigma(z)=\sigma_1\chi_1(z)+\sigma_2\chi_2(z),\ \chi_1(z)+\chi_2(z)=1,\ \chi_1(z)\chi_2(z)=0,$$

где $\varepsilon_i$, $\sigma_i$ – показатели ослабления и рассеяния компонент смеси с номером $i$ ($i=1,2$), $\chi_i(z)$ – индикаторная функция, определяющая вероятность наличия в данной точке пространства соответствующей компоненты среды.

Результаты данного исследования демонстрируют существенное влияние флуктуаций оптических параметров бинарной стохастической среды на перенос излучения. В частности вариации коэффициента ослабления $\varepsilon(z)$, а также изменчивость геометрической структуры среды, определяемой индикаторными функциями $\chi_i(z)$, приводят к значительным изменениям коэффициента пропускания рассеивающего слоя как для монохроматического излучения (длина волны фиксирована), так и в более широком спектральном диапазоне (длина волны варьируется).

Полученные закономерности рассеяния излучения в подобных стохастических структурах могут быть использованы в задачах оперативного мониторинга, дистанционного зондирования.