# ВКЛАД БАБСТОНОВ В ОГРАНИЧЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОТКРЫТЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ

Мышкин В.Ф.<sup>1</sup>, Хан В.А.<sup>2</sup>, Бурдакина О.В.<sup>3</sup>, Семенов Д.А.<sup>4</sup>, Усков Т.И.<sup>5</sup>, Туголуков В.А.<sup>6</sup> <sup>1</sup> Томский политехнический университет, ИЯТШ, профессор, e-mail: gos100@tpu.ru <sup>2</sup>Институт оптики атмосферы имени академика В.Е. Зуева СО РАН, внс, e-mail: nt.centre@mail.ru <sup>3</sup> Томский политехнический университет, ИЯТШ, аспирант, e-mail: zatcepina@nnc.kz <sup>4</sup> Томский политехнический университет, ИЯТШ, аспирант, e-mail: DmiAndrSemenov@tvel.ru <sup>5</sup> Томский политехнический университет, ИЯТШ, группа 0A14, e-mail: tiu1@tpu.ru <sup>6</sup> Томский политехнический университет, ИЯТШ, группа 0A14, e-mail: vat48@tpu.ru

## Введение

Поверхность океана занимает более 70 % поверхности Земли. При этом мировой океан, дно морей и океанов являются неисчерпаемыми источниками биологических ресурсов, неорганических полезных ископаемых и углеводородов. Поэтому разрабатываются и внедряются технологии освоения подводных ресурсов. При проведении подводных работ по освоению подводных энергетических ресурсов необходимы системы оперативной связи между двумя подвижными объектами, не связанные кабельными линиями. В настоящее время разрабатываются подводные лазерные системы связи.

Основная проблема подводной связи по открытой линии является сезонная и географическая изменчивость оптических параметров открытых подводных линий связи. Как правило, в настоящее время при моделировании работы систем подводных линий связи учитываются не все компоненты водной взвеси. Например, в любой воде присутствуют нанопузырьки, названные Бункиным Н.Ф. бабстонами [1]. При этом стабилизация бабстонов происходит за счет формирования ими кластеров субмикронных размеров. Наличие кластеров игнорируется большинством моделей водных систем.

Поэтому целью настоящих исследований ставилась изучение влияния водной взвеси на распространение наносекундных лазерных импульсов в воде, содержащей лишь кластеры бабстонов.

#### Формирование рассеянных потоков и расчетная формула

Распространяющееся в водоемах оптическое излучение ослабляется из-за взаимодействия со взвешенными микрочастицами и растворенными веществами [2]. Считается, что рассеяние излучения в мутных средах играет более важную роль, чем поглощение. Это связано с тем, что за счет рассеяния подсвечивающего излучения в толще воды, объекты под водой наблюдаются на фоне сплошного, в плоскости изображения приемного объектива, потока излучения. Поэтому уменьшается контраст изображения предметов, наблюдаемых через мутную воду. Знание факторов, оказывающих превалирующее влияние на распространение оптических импульсов в мутной воде, необходимо для формирования оптимальной геометрии освещения при проведении подводных работ или разработки и эксплуатации аппаратуры для подводной оптической связи (ПОС) по открытым линиям.

На рис. 1 показаны траектории рассеянных потоков (РП), из которых формируется поток излучения, попадающая в приемную апертуру фотоприемника (ФП) ПОС [3]. Известно, что при каждом рассеянии на микрочастицах мощность лазерного излучения уменьшается в десятки раз. Поэтому при моделировании учитывали лишь двукратное рассеяние. Также возможен вклад потоков излучения, в одно из рассеяний которых происходит от передних поверхностей излучателя (Из) или ФП.



Рис. 1. Схема формирования основных потоков, попадающих на ФП: 1 – двукратное рассеяние; 2 – рассеяние от торца Из; 3 – рассеяние от торца ФП; 4 – апертура ФП; 5 – области рассеяния; 6 – выходные окна

Формулу для расчета мощности рассеянного потока (РП), для одной компоненты взвеси, сформированного за счет двукратного рассеяния лишь от частиц взвеси на подводной трассе и попадающего на вход ФП, можно представить в виде:

$$P_{pac} = P_0 e^{-\alpha l_1} \left[ CV S^{sca} \sigma(\theta_1) \Omega(\delta) \right] e^{-\alpha l_2} \left[ CV S^{sca} \sigma(\theta_2) \Omega(\delta) \right] e^{-\alpha l_3}, \tag{1}$$

где  $\Omega(\delta) = \pi tg^2 0.5\delta$  - телесный угол между двумя направлениями, для которых рассчитывается индикатриса рассеяния  $\sigma(\theta)$ ,  $S^{sca}$  - эффективное сечение рассеяния, C – концентрация компоненты взвеси, V – объем элементарной расчетной ячейки.

Была разработана компьютерная программа, учитывающая следующие потоки, попадающие на вход ФП и определяющие передаточную характеристику трассы ПОС: двукратное рассеяние лишь от частиц взвеси, находящихся как впереди Из, так и позади него; последовательное рассеяние от взвеси и торца Из или ФП. При этом траектория с рассеянием от передней поверхности ФП требует трехкратного рассеяния. Однако, учет этой траектории РП связан со значительно большей эффективностью рассеяния от шероховатой поверхности, чем от аэрозоля.

На рисунке 2 приведен интерфейс программы, позволяющий задавать параметры ПОС: длину трассы, угол приемной апертуры ФП, длительность лазерного импульса. Параметры водной взвеси задаются через файл в формате «txt». Выделена возможность учета или игнорирования потока, рассеивающегося от взвеси, находящегося позади Из. Расчетные данные выводятся в виде графика через интерфейс и записываются в файл после нажатия клавиш «D>F» или «C>F». Программа позволяет учитывать одновременно четыре компоненты взвеси. Результаты расчета выводятся на интерфейс или сохраняются в файл как отдельно для каждой компоненты, с учетом её относительного вклада, так и сумма их любой комбинации. На рис. 2 зеленым цветом показан график временного хода РП от кластеров бабстонов, а черным – суммарный поток, учитывающий также прошедший лазерный импульс. Форму лазерного импульса задавали в виде «трапеции» с длительностью переднего и заднего фронта не более 0,045 нс.



Рис. 2. Интерфейс программы для моделирования кластеров бабстонов: зеленая линия – рассеянный поток; черная – суммарный поток

Из рис. 2 видно расплывание ширины регистрируемого ФП импульса излучения. Это связано с тем, что при большом поле зрения ФП длины трасс РП могут значительно превышать расстояние между излучателем и ФП. Поэтому максимум рассеянного потока может значительно отставать от заднего фронта прошедшего лазерного импульса.

## Результаты моделирования и их анализ

При предварительном моделировании рассматривали лишь следующие условия: поле зрения ФП – 10°, 40°, 90°; размер кластеров бабстонов – 0,16, 0,25, 04, 0,6 мкм, длина трассы менее 150 м.

Результаты моделирования для РП, прошедших на ФП для трасс разных длин, приведено на рис. 3. Видно, что для преимущественно рассеивающих частиц, к которым относятся бабстоны, при некоторой длине трассы мощность РП может превышать мощность лазерного излучения, прошедшего на вход ФП без рассеяния.

Возрастание РП связано с увеличением объема, из которого он формируется. Уменьшение РП обусловлено уменьшением проходящего потока на длинных трассах. В зависимости от комбинации диаметра и концентрации кластеров бабстонов график изменения мощности РП ( $P_{sca}$ ) может повторять форму графика, приводимого на рис. 3. Это соответствует условиям: диаметр кластера 0.16 мкм, их концентрация  $10^8$  см<sup>-3</sup> при величине поля зрения ФП  $10^\circ$  и  $90^\circ$ ; а также условиям: 0.25 мкм,  $10^8$  см<sup>-3</sup>,  $90^\circ$ . Для всех остальных рассматриваемых случаев график зависимости РП от длины трассы составляет

восходящую или спадающую часть графика, приведенного на рис. 3. При концентрации  $10^9$  см<sup>-3</sup> соотношение  $P_{\text{max}}/P_{\text{tr}}$  доходит до 0.3 и уменьшается при уменьшении концентрации. Например, при концентрации  $10^8$  см<sup>-3</sup> эта величина уменьшается до 0.03. При концентрациях не более  $10^7$  см<sup>-3</sup> величина  $P_{\text{max}}/P_{\text{tr}}$  не превышает  $10^{-4}$ .



Рис. 3. Зависимость от длины трассы мощности РП на входе в ФП: *P*<sub>tr</sub> – прошедший поток; *P*<sub>sca</sub> – рассеянный поток

На рис. 4 приведена обобщенная форма выходного сигнала ФП для лазерных импульсов длительностью менее 1 нс. При этом рассеяние происходит от преимущественно рассеивающей среды. Рис. 4 показывает, что при распространении в рассеивающей среде уменьшается отношение переменной составляющей электрического тока ФП к максимальному току, формируемому бабстонами, являющийся соотношением сигнал-шум.



Рис. 4. Общий вид сигнала ФП, формируемом серией импульсов: красная линия – лазерные импульсы; черная – суммарный поток

Результаты моделирования показывают, что на подводной трассе, содержащей лишь кластеры бабстонов диаметрами 0.16 мкм и 0.25 мкм и не содержащей других взвешенных частиц (чистая прозрачная вода), мощность РП, попадающего на ФП, значительно меньше, чем прошедшего потока. При концентрации кластеров бабстонов  $10^5$ - $10^6$  см<sup>-3</sup>, прошедший поток составляет не менее 0,9 от падающей величины, даже на трассах длиной более 100 м. Поэтому на трассах длиной 1-150 м в чистой воде влиянием кластеров бабстонов на ширину прошедших оптических импульсов длительностью 2 нс можно пренебречь, даже при максимальной скорости передачи информации.

Вторая причина ограничения длины линии связи ПОС, кроме дисперсии передаваемых импульсов, может быть связана с уменьшением мощности прошедшего на ФП излучения. Данные расчетов показывают, что фатальное ослабление в 60 дБ для телекоммуникационных линий через чистую воду достигается при увеличении длины линии.

### Заключение

Показано, что дисперсией лазерных импульсов длительностью 2 нс, используемых на подводных линиях связи, при наличии в воде лишь бабстонов, можно пренебречь. Ограничение длины трассы ПОС связано с ослаблением излучения.

#### Список использованных источников

1. Бункин Н.Ф., Бункин Ф.В., Бабстонная структура воды и водных растворов электролитов // УФН. – 2016. – Т. 186, № 9. – С. 933–952. – DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.05.037796.

2. Yi X., Li Z., Liu Z. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, № 6. – P. 1273–1278.

3. Myshkin V.F., Khan V.A., Turin S.V., Poberejhnikov A.D., Balandin S.F., Sosnovskiy S.A., Abramova E.S. Propagation of optical pulses in natural waters // Proc. SPIE 12341, 28<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123411E, 7 December 2022. – DOI: https://doi.org/10.1117/12.2644982.