

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОКЕАНА

Обсуждаются проблемы использования оптических методов при изучении экологической обстановки в местах интенсивных техногенных воздействий в морской среде. Анализируются преимущества таких методов при необходимости оперативной оценки экологической обстановки в зонах аварийных ситуаций. Делается вывод о перспективности оптических методов при проведении экологического мониторинга океана.

Problems of using the optical methods in appraisal of ecological conditions are discussed purposefully for areas of intensive technogenical impacts to the sea environment. Advantages of these methods are analyzed from the point of the urgent estimation of ecological conditions in spots of emergencies. Optical methods are concluded to have the high prospects for carrying out the environmental monitoring of the ocean.

Современный морской нефтегазовый комплекс (МНГК) представляет собой сложную геотехническую систему, в которой непрерывно взаимодействуют две подсистемы – природная и техногенная. Оптимизация все возрастающей техногенной нагрузки от МНГК на окружающую среду (ОС) при освоении минеральных ресурсов океана должна базироваться на принципе соответствия техногенного фактора (уровня и объема техногенеза) природному (способности биосферы к самоочищению и самовосстановлению). Одним из важнейших направлений такой оптимизации является организация эффективного контроля экологического состояния окружающей среды в местах функционирования МНГК. В последние годы среди таких методов все шире используются оптические методы исследований [3], обеспечивающие трудно достижимые другими способами высокие оперативность и репрезентативность измерительной информации при необходимости экспрессной оценки экологического состояния окружающей среды (например, в местах размещения объектов МНГК и соответствующей инфраструктуры), когда на проведение экологических исследований традиционными способами (с отбором проб мор-

ской воды и последующим их изучением в береговых стационарных лабораториях) просто нет времени [1, 2].

Структура световых полей в морской среде определяется как свойствами ее основы – чистой (дистиллированной) воды (которые хорошо известны), так и содержащимися в природной морской воде оптически активными (поглощающими и рассеивающими свет) примесями (ОАП) (в том числе пигментами фитопланктона, окрашенным растворенным органическим веществом («желтым» веществом), детритом («мертвым» органическим веществом), органической и минеральной взвесью, плавающими на морской поверхности частицами, пленками нефти и нефтепродуктов и т.д.) [4-6]. Все это является физической предпосылкой использования оптических методов и средств экологического контроля. Перераспределение таких ОАП в морской среде под влиянием природных и техногенных процессов приводит к соответствующим возмущениям фоновой структуры световых полей, которые, в свою очередь, регистрируются в натурном гидрооптическом эксперименте как градиенты оптических характеристик морской среды – индикаторы экологического неблагополучия в контролируемой

акватории (экологических аномалий). Техногенное загрязнение морской среды в местах дислокации объектов военной техники чаще всего обусловлено попаданием в нее нефти и нефтепродуктов, а также сточных вод и химических компонентов вооружения и боеприпасов. Преимущество оптических средств обнаружения такого загрязнения морской среды заключается прежде всего в их уникально высокой чувствительности к изменчивости световых полей, обусловленной соответствующим техногенным воздействием.

Ядром современных информационно-оптических технологий (ИОТ) оперативного контроля экологического состояния морской среды является совместное использование результатов натурных гидрооптических исследований и методов математического моделирования структуры световых полей и пространственно-временного распределения ОАП. Такие технологии направлены, прежде всего, на решение прямых и обратных задач оптического мониторинга экологического состояния (ОМЭС) морской среды [3, 6].

Прямые задачи в данном случае базируются на априорном знании пространственно-временного распределения ОАП морской среды в начальный момент времени (в том числе мест расположения источников ОАП, их параметров, свойств самих ОАП), а также условий и закономерностей перераспределения ОАП в контролируемой акватории. В результате решения прямых задач осуществляются восстановление яркости и облученности светового потока в толще морской среды и оптических характеристик морской среды (связанных с соответствующим распределением ОАП), а также прогноз динамики этих полей.

Обратные задачи ОМЭС морской среды [6] представляют гораздо больший интерес для экологического контроля. Решение этих задач опирается на знание поля первичных гидрооптических характеристик морской среды (ПГХ) в изучаемой акватории (обычно из результатов натурных гидрооптических исследований и теоретических оценок), а также закономерностей и

условий перераспределения ОАП в контролируемой акватории. В результате решения подобных обратных задач осуществляются восстановление поля концентраций ОАП в контролируемой акватории, выявление мест расположения оптических (и экологических) аномалий морской среды, изучение и идентификация их природы, оценка и прогноз экологической обстановки. Следует заметить, что, как правило, обратные задачи, возникающие при обработке результатов натурных экспериментов, являются некорректно поставленными и их решение возможно лишь при определенных (часто довольно грубых) упрощениях и использовании специальных методов.

Процедура решения обратных задач ОМЭС морской среды включает:

- проведение натурального гидрооптического эксперимента по изучению пространственно-временной изменчивости спектральной прозрачности морских вод (поля прозрачности);
- восстановление из полученных результатов методом «спектральной реконструкции» соответствующего поля ОАП в изучаемой акватории;
- оценка интегрального экологического состояния контролируемой акватории по восстановленному полю ОАП, в том числе выявление опасных экологических аномалий (градиентов в пространственно-временном распределении ОАП).

Метод спектральной реконструкции базируется на предположении о линейной зависимости между спектральными показателями ослабления света и концентрациями соответствующих ОАП. Пусть морская среда в контролируемой акватории содержит p видов ОАП, а изучение ее спектральной прозрачности осуществляется одновременно в N спектральных каналах измерителя прозрачности морской воды, соответствующих спектральным особенностям (полосам поглощения и областям рассеяния) конкретных ОАП. Тогда на фиксированной глубине в j -м спектральном канале спектральный показатель ослабления света $s(\lambda_j)$ можно представить в виде:

$$c(\lambda_j) - c_w(\lambda_j) = \sum_{i=1}^p \alpha_i(\lambda_j) C_i$$

при $j = 1, 2, \dots, N,$ (1)

где $c_w(\lambda_j)$ – ослабление света чистой водой на длине волны λ_j ; $\alpha_i(\lambda_j)$ – обобщенный удельный показатель поглощения или рассеяния i -й примеси на длине волны λ_j (показатель поглощения или рассеяния единицы объема морской среды); C_i – объемная концентрация i -й ОАП.

Если $N \geq p$ и известны (априори или из независимого гидрооптического эксперимента) все $\alpha_i(\lambda_j)$, то систему N линейных уравнений с p неизвестными (1) можно разрешить относительно p объемных концентраций ОАП C_i . Точность такого восстановления обычно невысока (не выше 30 %), что объясняется грубостью выбранного линейного приближения, но в большинстве случаев (например, при проведении оперативного экологического контроля) вполне достаточно для предварительных экспрессных оценок экологической ситуации.

Другим важным аспектом использования ИОТ для решения обратных задач ОМЭС морской среды является обнаружение и картирование нефтяного загрязнения границы раздела море – атмосфера при ее дистанционном зондировании с борта движущегося судна или низко летящего вертолета. Для решения этой задачи можно использовать как пассивное лоцирование морской поверхности (МП) с подсветкой от небосвода и солнца [6], так и активное лазерное лоцирование МП излучением малогабаритного лазера видимого или ближнего ИК-диапазонов [4], обеспечивающих выявление нефтяного загрязнения за счет различия в коэффициентах отражения чистой МП и МП, покрытой пленкой нефти.

Целесообразно рассмотреть физические предпосылки использования лазерного локатора для выявления на МП пленок нефти и нефтепродуктов. Поскольку из-за морского волнения граница раздела море – атмосфера обычно является шероховатой, при ее лоцировании узким лазерным пучком правильнее говорить не об отражении, а о рассеянии от нее. Такое рассеяние характе-

ризуется двумя компонентами – когерентной (зеркальной), соответствующей зеркальному отражению ($P_{\text{кор}}$), и некогерентной (диффузной), соответствующей диффузному рассеянию ($P_{\text{диф}}$) под углами наблюдения, отличными от зеркального. Чем сильнее шероховатость МП, тем значительнее вклад некогерентной компоненты, по сравнению с когерентной.

Доля когерентной компоненты, зарегистрированной фотоприемным устройством (ФПУ) лазерного локатора, по отношению к общей мощности зондирующего излучения P_o , [2]

$$\frac{P_{\text{к\ddot{a}}\text{r}}}{P_o} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{G_{\text{\ddot{e}}\text{c}\ddot{e}} G_{\text{i}\ddot{o}}}{(r_1 + r_2)^2} R |\xi|^2, \quad (2)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения; $G_{\text{изл}}$ и $G_{\text{пр}}$ – диаграммы направленности по мощности лазерного источника излучения и ФПУ локатора; r_1 и r_2 – расстояния от источника и ФПУ до МП; R – коэффициент отражения МП; $|\xi|^2$ – степень шероховатости МП, $|\xi|^2 \leq 1$, причем $|\xi|^2 = 1$ для абсолютно гладкой МП.

Соответственно, доля некогерентной компоненты [2]

$$\frac{P_{\text{\ddot{a}}\text{e}\ddot{o}}}{P} = \frac{1}{(4\pi)^3} \int \frac{G_{\text{\ddot{e}}\text{c}\ddot{e}} G_{\text{i}\ddot{o}}}{r_1^2 r_2^2} \sigma(\theta_i, \theta_s) ds, \quad (3)$$

где $\sigma(\theta_i, \theta_s)$ – дифференциальное сечение рассеяния света МП при падении на нее зондирующего пучка под углом θ_i и наблюдении рассеяния в направлении θ_s ; ds – элемент рассеивающей поверхности.

В приближении Кирггофа, т.е. при условии, что возвышения МП много больше длины волны зондирующего света, [2].

$$\sigma = 4\pi k^4 \cos^2 \theta_i \cos^2 \theta_s W(p) R, \quad (4)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число световой волны; λ – длина волны света; $W(p)$ – спектральная плотность возвышений шероховатой МП, для абсолютно гладкой поверхности $W(p) = 0$; p – пространственное волновое число МП, в рассматриваемом случае $p = k(\sin \theta_s - \sin \theta_i)$; R – «энергетический» коэффициент отражения МП.

Как следует из анализа формул (2)-(4), при лоцировании МП в надир, т.е. вертикально вниз, по сравнению с чистой МП, наличие на ней пленки нефти или нефтепродуктов, как правило, увеличивает регистрируемый оптическим локатором сигнал зеркального отражения, что может быть связано со следующими причинами:

- отражательная способность пленок нефти и нефтепродуктов обычно выше, чем чистой воды, особенно в ближней области инфракрасного спектра [6];

- наличие на взволнованной МП пленки нефти за счет уменьшения коэффициента поверхностного натяжения границы раздела море – атмосфера приводит к определенному «успокоению» морского волнения (к уменьшению влияния макрошероховатости МП) и, как результат, к возрастанию когерентной компоненты и уменьшению некогерентной [4];

- из-за возникновения интерференционных эффектов в тонких пленках при изменении их толщины коэффициент отражения МП, покрытой такими пленками, носит осциллирующий характер, причем максимальное значение коэффициента отражения такой поверхности может в несколько раз превосходить коэффициент отражения чистой МП [6].

Таким образом, максимальный суммарный оптический контраст МП, покрытой

нефтяной пленкой, по сравнению с чистой МП при наличии морского волнения, даже без учета влияния осцилляций коэффициента зеркального отражения, может достигать 6 раз и более, что создает благоприятные условия для регистрации нефтяного загрязнения.

Итак, применение ИОТ экологического контроля состояния морских акваторий в местах интенсивных природных и техногенных воздействий обеспечивает оперативное выявление и обследование экологических аномалий, в том числе в местах расположения объектов морских нефтегазовых комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алешин И.В.* Оптические методы в экологическом мониторинге природных вод / И.В.Алешин, Е.А.Цветков, В.А.Яковлев // *Оптический журнал.* 1997. Т.64. № 3. С.82-86
2. *Алешин И.В.* Оптические методы изучения природных и антропогенных процессов // *Оптический журнал.* 2001. Т.68, № 4. С.27-36.
3. *Алешин И.В.* Экологический мониторинг Мирового океана / Санкт-Петербургский морской техн. ун-т. СПб, 1997. 75 с.
4. *Долин Л.С.* Справочник по теории подводного видения / Л.С.Долин, И.М.Левин. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 220 с.
5. *Иванов А.П.* Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и Техника, 1975. 504 с.
6. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 280 с.