УДК 551.501.816+551.508.856

В.М.Сидоренко, М.М.Шевелько, Д.В.Сидоренко

Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»

ЭКСПРЕССНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АКВАТОРИЙ

Разработаны новые методы дистанционного определения толщины, области разлива и типа пленки нефти на водной поверхности с помощью флуориметрического лидара, обеспечивающие мониторинг нефтяных пленок в диапазоне толщины от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров с борта движущегося судна и низколетящего авианосителя. Для экспрессного измерения пленок толщиной более 100 мкм, разработан ультразвуковой экспресс-метод. При реализации этого метода измерения проводят в реальном масштабе времени путем зондирования водной поверхности с движущегося судна с помощью размещенных под водой источника и приемника ультразвука. Работоспособность указанных методов изучена экспериментально в лабораторных условиях с использованием различных типов нефти, разлитой на водной поверхности. Рассмотрены принципы построения биотехнической системы для оценки текущего состояния и прогноза качества водных сред, загрязненных нефтепродуктами.

The new methods of remote measurement of oil spill thickness and zone, kind of oil film on the water surface with the help of fluorimetric lidar have been developed. It will enable a user to monitor the oil spill thickness from one or more up to several dozens of micrometers from shipboard or a low flying aircraft. There has been developed the ultrasonic method for express measurement of oil film over 100 micrometers thick. The measurement is carried out in real time by means of water surface ultrasonic sounding from shipboard with the help of an ultrasound bleeper and detector placed under the water. The efficiency of the above-mentioned methods has been experimentally tested in special laboratories; different kinds of oil spill being used in these experiments. There were analyzed the principles of construction of the bioengineering system for the estimation of the current state and for forecasting the quality of oil-contaminated water.

Одним из наиболее опасных для экосистем видов загрязнений являются нефтепродукты (НП). Отрицательное воздействие пленки НП на живые организмы водной экосистемы обусловлено в основном двумя факторами: непосредственным влиянием растворенных фракций НП и нарушением газового обмена через границу атмосфера – вода. Для оценки степени воздействия НП на биоценоз экосистемы необходимо знать толщину пленки d и тип НП. Согласно [1], толщину пленки d можно определить дистанционно с помощью флуориметрического лидара по выражению

$$d = \frac{1}{k_{1p}} \ln[(R_w - R_p)/(R^p - R_p)],$$

где R_W, R_p и R^p – сигналы флуоресценции соответственно воды без пленки НП, бесконечно толстого слоя НП и слоя НП на поверхности воды.

Последовательность операций при дистанционном определении толщины пленки неизвестного нефтепродукта выглядит следующим образом [7]. Вначале производят измерение интегральной интенсивности флуоресценции (ИФ) воды над чистой поверхностью. Зная интегральное значение ИФ и контур полосы флуоресценции воды, определяют спектральное распределение ИФ воды. Измеряют дистанционно суммарный спектр флуоресценции нефтепродукта и воды над загрязненной поверхностью. По результатам измерений рассчитывают спектр $R_p(\lambda)$, на основании которого определяют тип нефтепродукта и толщину пленки с учетом каталога величин k_{1p}, измеренных для различных образцов нефтепродуктов. Этим методом можно измерять толщину тонких пленок НП d до нескольких десятков микрометров с помощью флуориметрических лидаров, расположенных на борту исследовательского судна или низколетящего авианосителя. При $d > 100$ мкм можно использовать ультразвуковой метод [3], который базируется на анализе частотных ха-

рактеристик отраженного сигнала. Наличие слоя нефтепродукта толщиной d на поверхности воды изменяет характеристики отраженного сигнала по отношению к случаю, когда такой слой отсутствует ($d = 0$). Это связано с тем, что все виды нефтепродуктов имеют акустическое (волновое) сопротивление $Z = \rho c$ (здесь ρ – плотность среды; c – скорость распространения ультразвука в среде), отличное от воды.

Решена задача об отражении упругой волны от слоя жидкости на поверхности другой жидкости (воды) при нормальном и наклонном падении. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что частотные характеристики амплитуды и фазы отраженного сигнала имеют периодический характер с периодом, зависящим от толщины слоя нефтепродукта, находящегося на поверхности воды. Эксперименты проводились на специально разработанном стенде с кюветой (ширина 150 мм, высота 180 мм и толщина 50 мм). На дне кюветы были установлены источник и приемник ультразвукового излучения, оси которых пересекались на поверхности залитой в кювету воды. На эту поверхность наносился исследуемый слой нефтепродукта. В качестве преобразователей использовались пьезокварцевые пластины X-среза, демпфированные с тыльной стороны. Диапазон сканирования частоты задавался генератором (2-3 МГц).

Уровень воздействия НП на водную экосистему в значительной степени связан с динамикой изменения характеристик области загрязнения на поверхности. Этот вопрос довольно подробно рассмотрен в работе [2], однако целесообразно дополнить это рассмотрение универсальным механизмом расширения и перемещения крупномасштабной области нефтяных загрязнений с характерными размерами около нескольких десятков километров за счет геострофических течений. Был разработан метод определения поля горизонтальных скоростей геострофических течений на основании экспериментальных данных о температуре и солености, полученных на двумерной сетке в вертикальном сечении исследуемого района океана. Было решено гидростатическое уравнение для измерения давления с глубиной с нулевым граничным условием на поверхности. На основании рассчитанных значений давления и их горизонтальных градиентов в плоскости гидрографического разреза были установлены скорости геострофических течений, вызванных изменчивостью давления на основании решения уравнения геострофического баланса. Для численного решения уравнений гидростатического давления и геострофического баланса, был использован метод конечных элементов (МКЭ), который в отличие от метода конечных разностей позволяет учесть топографию дна океана. При этом поле распределения плотности воды в вертикальной плоскости аппроксимировано линейной комбинацией базисных функций со значениями в узлах сетки, полученными на основании данных о температуре и солености.

Анализ точности расчета скоростей течений при аппроксимации зависимости давления от координат линейными и квадратичными базисными функциями показал, что в первом случае погрешность в ряде случаев может превышать 10 см/с. Использование квадратичных базисных функций снижает максимальную погрешность более, чем в 3 раза. Дальнейшего увеличения точности расчета скоростей геострофических течений можно достичь за счет учета компонента скорости, вызванного градиентами возвышений уровня океана над геодимом. При этом необходимо использовать дополнительные данные, которыми, в частности, могут быть характеристики поверхностных океанических волн.

Разработанный метод расчета был с успехом использован для определения поля скоростей геострофических течений на основании гидрографических данных, полученных на меридиональном разрезе протяженностью примерно 2000 км с глубинами до 4500 м в районе между Тасманией и Антарктидой. Установлено, что максимальные значения скоростей достигают 40 см/с. Укажем также, что на поверхности горизонтальные скорости могут меняться от 20 до 40 см/с на расстоянии 10-20 км. Кроме того, наблюдаются вертикальные градиенты скорости го-

ризонтальных течений примерно 0,02 см/(с·м). Полученные результаты показывают, что рассмотренный механизм может играть существенную роль в динамике характеристик нефтяных загрязнений акваторий.

С учетом разработанных методов экспрессного контроля параметров нефтяных загрязнений предложены принципы построения биотехнической системы (БТС), позволяющей проводить оценку текущего и прогнозировать будущее состояние водной экосистемы на основании данных флуориметрических наблюдений. Введем функцию состояния экосистемы $\eta_r(t)$ в момент времени t по показателю r. Основными показателями состояния r являются концентрация биомассы (или концентрация хлорофилла $C_{хл}$) на первом трофическом уровне и величина чистой первичной продукции, определяемые оригинальными дистанционными флуориметрическими методами [4-6]. Кроме того, в качестве показателя r можно принять и другие характеристики экосистемы.

Для интегральной характеристики системы целесообразно использовать обобщенную функцию состояния $\eta(t) = \sum_r \kappa_r \eta_r(t)$, где k_r – весовой коэффициент. Для количественного определения допустимого воздействия $q_д$ необходимо знать начальное (осредненное фоновое) состояние экосистемы. Тогда критерий допустимости воздействия $q_д$ вытекает из условия отклонения системы от ее среднего (нормального) состояния, не превышающего естественных фоновых флуктуаций (без нарушения экосистемы):

$$\left|\eta(t, q_д) - \overline{\eta_1(t)}\right| \le \left|\eta_1(t) - \overline{\eta_1(t)}\right|,$$

где $\eta_1(t)$ – характеристика нормального состояния системы.

Одним из информативных показателей r служит соотношение между концентрациями в фотической зоне биомассы фитопланктона и растворенного органического вещества (РОВ). Информация об этом соотношении может быть получена флуориметрически на основании данных об отношении интенсивностей флуоресценции хлорофилла ($I_{хл}$) и РОВ (I) с использованием методов, изложенных в [4-6]. Для равновесной системы, находящейся в гомеостазе, при неизменных гидрофизических характеристиках это соотношение должно быть стабильным. Изменение его свидетельствует о нарушении равновесного состояния системы и притоке загрязняющих веществ. Анализ динамики этого соотношения позволяет получить дополнительную информацию о природе загрязняющего вещества. Рассмотренные принципы построения БТС предполагается использовать при разработке аппаратуры, предназначенной для мониторинга водных экосистем.

Внедрение разработанных экспрессных методов и реализующей их аппаратуры позволит резко повысить производительность исследований и себестоимость экологического мониторинга акваторий, в том числе при чрезвычайных ситуациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование методики использования эксимерного лазера для измерения толщины пленки нефтепродуктов на поверхности воды / А.П.Жевлаков, С.А.Пакконен, Д.С.Лещенко В.М.Сидоренко // Океанология. 1993. Т.33 (3). С.452-455.

2. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.

3. *Сидоренко В.М.* Разработка ультразвукового экспресс-метода контроля толщин пленок разлива нефтепродуктов / В.М.Сидоренко, А.Н.Перегудов, М.М.Шевелько, Н.А.Мариловцев // Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий: Тез. докл. науч.-прак. конф. / СПбГЭТУ. СПб, 2002. С.19-20.

4. *Сидоренко В.М.* Применение оптических спектральных методов в медицине, биологии и экологии / СПбГЭТУ. СПб, 2001. 80 с.

5. *Сидоренко В.М.* Механизм влияния фотоадаптации на спектральные характеристки клеток фитопланктона // Материалы 5-й Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям / СПбГЭТУ. СПб, 2000. Т.1. С.127-130.

6. *Сидоренко В.М.* Определение первичной продукции акваторий на основании флуориметрических данных / В.М.Сидоренко, М.Д.Маголмедов // Материалы 5-й международной конференции по мягким вычислениям и измерениям / СПбГЭТУ. СПб, 2002. Т.1. С.150-153.

7. *Сидоренко В.М.* Дистанционный флуориметрический мониторинг нефтяных загрязнений на водной поверхности / В.М.Сидоренко, М.Д.Маголмедов, П.Г.Огнева // Записки Горного института. СПб, 2001. Т.149. С.117-120.