

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ ПРОЗРАЧНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

*Е. В. Маньковская*

Морской гидрофизический институт НАНУ  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: ErmakVV@mail.ru

*Представлена информационная технология вторичной обработки и интерпретации данных измерений прозрачномера, устанавливаемого в составе комплекса оборудования для морской прибрежной гидрометеорологической станции БРИЗ. Информационная технология основана на эмпирических зависимостях, установленных для вод Черного моря, и позволяет значительно расширить диапазон получаемых параметров состояния морской среды без установки дополнительного измерительного оборудования.*

**Введение.** Отделом автоматизации океанографических исследований МГИ НАНУ разработан комплекс оборудования для морской прибрежной гидрометеорологической станции БРИЗ. Данный комплекс предназначен для установки в прибрежной зоне на платформы, мачты, эстакады, буйковые и донные станции на расстояниях до 500 метров от берега и на глубинах до 50 метров. В состав измерительной аппаратуры комплекса входят гидрологохимический модуль, прозрачномер, акустический волномер и СТД-измеритель уровня моря.

Прозрачномер обеспечивает измерение значений показателя ослабления света ( $m^{-1}$ ,  $I_g$ ) в красном и синем участках спектра. Представляет интерес получение дополнительной информации о параметрах состояния морской среды на основе этих измерений.

Это возможно при использовании информационных технологий, позволяющих на основе наборов первичных измеренных значений величин получить ряд вторичных показателей состояния среды. Для подобных операций используются различные ал-

горитмы, модели, аналитические зависимости и т.п.

В настоящей работе описывается разработанная информационная технология вторичной обработки и интерпретации данных измерений прозрачномера, устанавливаемого в составе измерительного комплекса БРИЗ. С помощью данной технологии в оперативном режиме можно получить дополнительный набор показателей состояния морской среды всего по двум измеренным физическим величинам.

Представленная информационная технология основана на эмпирических зависимостях, установленных для вод Черного моря.

**Информационная технология.** Прозрачномер измеряет показатель ослабления направленного света в двух участках спектра: красном – на длине волны 625 нм и синем – на длине волны 467 нм [1]. Измерения в синем участке позволяют следить за изменением содержания в воде растворенных органических веществ (РОВ), измерения в красной области дают возможность оценивать содержание в воде суммарной взвеси – минеральной и органической.

На рисунке 1 представлена схема последовательности вычислений, осуществляемых информационной технологией. Исходными данными являются первичные значения измеренных величин показателей ослабления направленного света  $\epsilon(467)$  и  $\epsilon(625)$ , рассчитанные при десятичном основании логарифма. Все дальнейшие расчеты также ведутся при десятичном основании логарифма.

Первой операцией перед вторичной обработкой данных является их фильтрация и исключение «возможно ложных» измерений. Фильтром служит регрессионная зависимость между величинами  $\epsilon(467)$  и  $\epsilon(625)$ , полученная на основе измерений 170 спектров показателя ослабления направленного света в Черном море:

$$\epsilon(625) = 0,788388187 \cdot \epsilon(467) + 0,110910964.$$

Диапазон изменения  $\epsilon(467)$  составляет  $0,11204 \pm 0,41168 m^{-1}$ . Коэффициент корреляции между указанными участками спектра  $R=0,9347$ . Величина доверительного

интервала для  $\epsilon(625)$ , определяемого из уравнения регрессии, рассчитывается для доверительной вероятности 0,999.

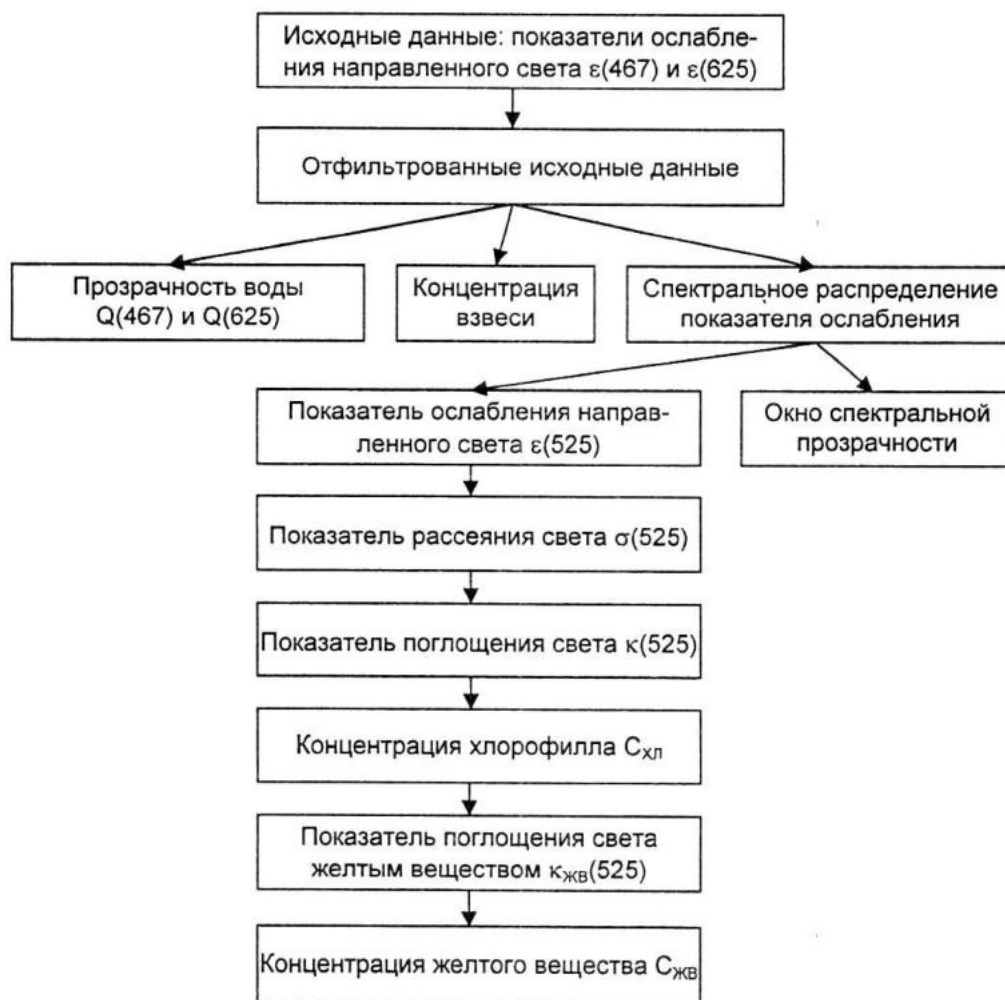


Рисунок 1 – Схема последовательности вычислений

После фильтрации исходных данных рассчитываются следующие вторичные показатели состояния морской среды для вод Черного моря:

- прозрачность воды;
- концентрация взвеси;
- спектральное распределение показателя ослабления направленного света;
- окно спектральной прозрачности;
- показатель рассеяния света водой;
- показатель поглощения света водой;
- концентрация хлорофилла;
- показатель поглощения света желтым веществом;
- концентрация желтого вещества.

#### 1. Прозрачность воды.

Для каждого значения показателя ослабления направленного света в двух участках спектра определяется величина прозрачности воды.

Прозрачность воды – коэффициент пропускания светового потока слоем воды толщиной 1 метр. Вычисляется по формуле:

$$Q(\lambda) = \frac{F(\lambda)_L}{F(\lambda)_0} = 10^{-\varepsilon(\lambda)},$$

где  $F(\lambda)_0$  – яркость пучка света, вошедшего в воду;

$F(\lambda)_L$  – яркость пучка света, прошедшего в воде расстояние  $L = 1$  метр;

$\varepsilon(\lambda)$  – показатель ослабления направленного света на длине волны  $\lambda$ .

#### 2. Концентрация взвеси.

Концентрация взвеси – весовая концентрация взвешенных минеральных и органических веществ в единице объема, мг/л. Для ее определения используется показатель

ослабления в красной области спектра, где изменчивость его величины зависит практически только от изменчивости концентрации взвеси.

Для вод Черного моря связь между концентрацией взвеси и показателем ослабления направленного света на дине волны  $\lambda = 625$  нм по [2] имеет вид:

$$B = 3,02 \cdot \varepsilon(625) - 0,31$$

Коэффициент корреляции  $r = 0,89$ . Среднеквадратическая ошибка  $\sigma = 0,074$  мг/л.

### 3. Спектральное распределение показателя ослабления направленного света.

Существует возможность восстановления спектрального распределения показателя ослабления направленного света по измерениям на двух, и даже на одной, длинах волн. Это можно сделать с помощью системы собственных ортогональных векторов,

$$\begin{cases} \varepsilon(467) = \langle \varepsilon(467) \rangle + C_1 \Psi_1(467) + C_2 \Psi_2(467) \\ \varepsilon(625) = \langle \varepsilon(625) \rangle + C_1 \Psi_1(625) + C_2 \Psi_2(625) \end{cases}$$

На рисунке 2 приведены экспериментальный и восстановленный по измерениям на двух длинах волн спектры распределения показателя ослабления направленного света в диапазоне длин волн 416-677 нм. Ошибка аппроксимации спектральных

описывающих спектральное распределение показателя ослабления в данном водоеме.

Спектральные величины  $\varepsilon(\lambda_i)$  в диапазоне длин волн 416-677 нм рассчитываются по значениям  $\varepsilon(467)$  и  $\varepsilon(625)$ , используя систему ортогональных векторов из [3] для спектров показателя ослабления направленного света в поверхностных водах Черного моря. Значения  $\varepsilon(\lambda_i)$  вычисляются по формуле:

$$\varepsilon(\lambda_i) = \langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle + C_1 \Psi_1(\lambda_i) + C_2 \Psi_2(\lambda_i),$$

где  $\langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle$  – среднестатистические значения показателей ослабления (таблица 1);

$\Psi_1(\lambda_i), \Psi_2(\lambda_i)$  – первый и второй ортогональные вектора (таблица 1);

$C_1, C_2$  – весовые коэффициенты.

Величины коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  определяются из системы уравнений:

функций показателя ослабления излучения в поверхностных водах Черного моря двумя собственными векторами составляет  $0,008 \text{ м}^{-1} (\lg)$ , что вполне приемлемо для решения большинства гидрооптических задач.

Таблица 1 – Средние величины показателя ослабления направленного света и два первых собственных ортогональных вектора

$\lambda$ , нм	$\langle \varepsilon(\lambda) \rangle$ , $\text{м}^{-1}$	$\Psi_1(\lambda)$	$\Psi_2(\lambda)$
416	0,304	0,298	-0,409
432	0,283	0,302	-0,309
467	0,228	0,269	-0,024
490	0,222	0,269	-0,078
506	0,215	0,259	0,002
525	0,218	0,256	0,002
547	0,218	0,254	-0,006
567	0,219	0,239	-0,003
587	0,234	0,233	0,084
610	0,270	0,224	0,196
625	0,290	0,221	0,196
640	0,291	0,209	0,306
677	0,337	0,207	0,294

#### 4. Окно спектральной прозрачности.

Окно спектральной прозрачности – длина волны, при которой величина показателя ослабления направленного света минимальна.

В восстановленном спектре показателя ослабления направленного света находится его минимальное значение

$\varepsilon_{\min} = \min(\varepsilon(\lambda))$  и соответствующая ему длина волны  $\lambda(\varepsilon_{\min})$ . Для минимального значения показателя ослабления рассчитывается максимальное значение прозрачности воды:

$$Q(\lambda(\varepsilon_{\min})) = 10^{-\varepsilon_{\min}}$$

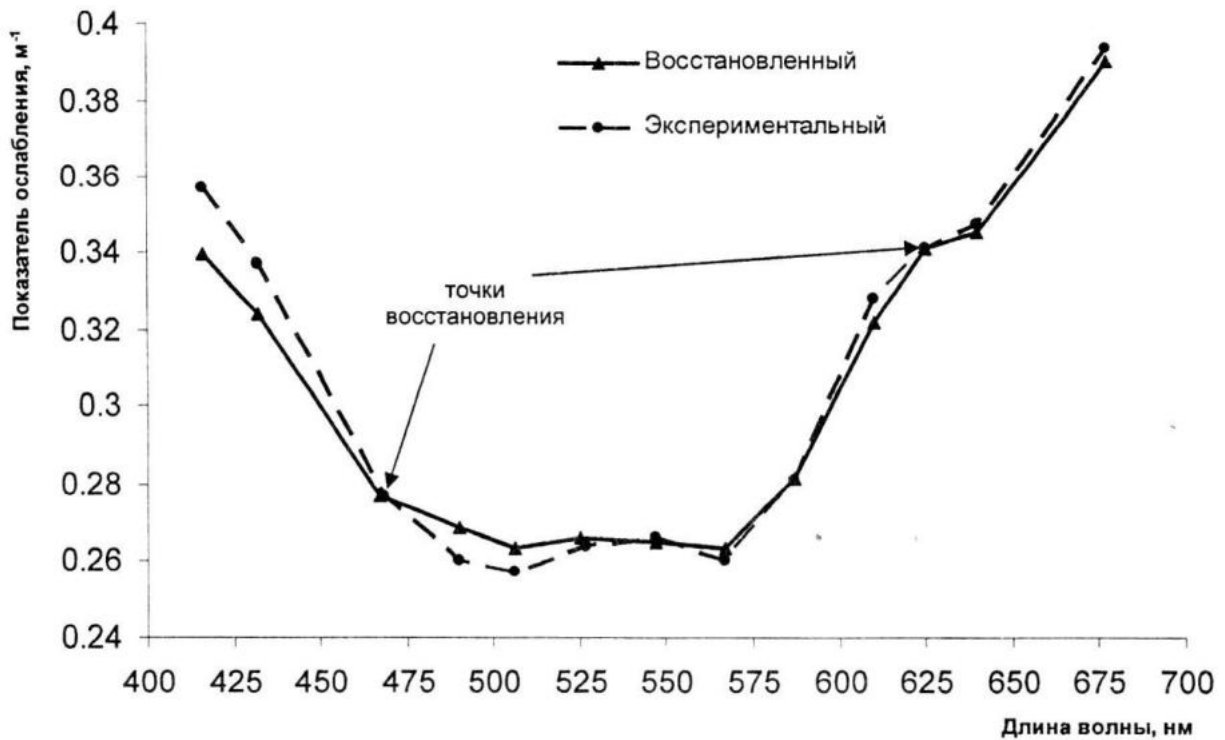


Рисунок 2 – Экспериментальный и восстановленный спектры показателя ослабления направленного света

#### 5. Показатели рассеяния и поглощения света водой.

Показатель ослабления направленного света состоит из суммы показателей поглощения и рассеяния света водой:

$$\varepsilon(\lambda) = \kappa(\lambda) + \sigma(\lambda).$$

По восстановленному спектру показателя ослабления определяется его величина для длины волны 525 нм –  $\varepsilon(525)$ , по которой рассчитывается показатель рассеяния  $\sigma(525)$  света водой, используя данные, полученные в работе [4]. Длина волны 525 нм в экспериментах, проводившихся в указанной работе, была выбрана с учетом спек-

тральных особенностей ослабления дневного света в водах Черного моря, которое минимально в данной области спектра [5]. В этой же области спектра наблюдаются и наиболее низкие значения показателя ослабления направленного света.

В [4] получено следующее соотношение для связи показателей рассеяния и ослабления света в водах Черного моря на длине волны 525 нм:

$$\sigma(525) = 0,98 \cdot \varepsilon(525) - 0,0315.$$

Коэффициент корреляции  $r = 0,998$ . Среднеквадратическая ошибка  $\sigma = 0,0034 \text{ м}^{-1}$ .

Далее определяется показатель поглощения как разница показателя ослабления и показателя рассеяния:

$$\kappa(525) = \varepsilon(525) - \sigma(525)$$

#### 6. Концентрация хлорофилла.

В клетках живой органической взвеси – фитопланктона – содержатся центры поглощения света, представленные различного рода пигментами. Главный из пигментов – хлорофилл «а». Концентрация хлорофилла «а»  $C_{хл}$  (мг/м<sup>3</sup>) рассчитывается по эмпирическому соотношению, установленному для вод Черного моря:

$$\lg C_{хл} = 2,36 \cdot \lg \varepsilon(467)_a + 0,83.$$

Коэффициент корреляции  $r = 0,693$ . Среднеквадратическая ошибка  $\sigma = 0,078$  мг/м<sup>3</sup>.

По концентрации хлорофилла в верхних слоях (до 100 м) морей и океанов определяют трофность вод: олиготрофные (мало продуктивные) –  $C_{хл} < 0,2$  мг/м<sup>3</sup>, мезотрофные (средней продуктивности) –  $C_{хл} = 0,2 \div 0,4$  мг/м<sup>3</sup>, эвтрофные (высокопродуктивные) –  $C_{хл} > 0,4$  мг/м<sup>3</sup>.

#### 7. Показатель поглощения света желтым веществом.

Показатель поглощения света желтым веществом (растворенными органическими соединениями) определяется из формулы связи поглощения света морской водой с поглощением света содержащимися в ней компонентами:

$$\kappa(\lambda)_a = \kappa(\lambda)_{чв} + \kappa(\lambda)_{жв} + \kappa(\lambda)_{хл},$$

где  $\kappa(\lambda)_a$  – суммарный показатель поглощения света морской водой;

$\kappa(\lambda)_{чв}$ ,  $\kappa(\lambda)_{жв}$ ,  $\kappa(\lambda)_{хл}$  – показатели поглощения света: чистой водой (не содержащей каких-либо примесей), желтым веществом и пигментами хлорофилла.

Из данной формулы показатель поглощения света желтым веществом определяется следующим образом:

$$\kappa(\lambda)_{жв} = \kappa(\lambda)_a - \kappa(\lambda)_{чв} - \kappa(\lambda)_{хл}$$

Расчеты также ведутся для длины волны 525 нм. Величина  $\kappa(525)_a$  определена выше. Показатель поглощения чистой водой величина постоянная. По [6]  $\kappa(525)_{чв} = 0,0181$  м<sup>-1</sup>.

Поглощение света хлорофиллом вычисляется по формуле:

$$\kappa(525)_{хл} = C_{хл} \cdot \kappa(525)_{уд.хл},$$

где  $C_{хл}$  – концентрация хлорофилла, мг/м<sup>3</sup>;

$\kappa(525)_{уд.хл}$  – удельный показатель поглощения света хлорофиллом, м<sup>2</sup>/мг.

Удельный показатель поглощения света хлорофиллом по [7] равен  $\kappa(525)_{уд.хл} = 0,0104$  м<sup>2</sup>/мг.

#### 8. Концентрация желтого вещества.

Известно, что спектральная зависимость показателя поглощения света желтым веществом аппроксимируется формулой:

$$\kappa_{жв}(\lambda) = \kappa_{жв}^{уд}(\lambda_0) \cdot C_{жв} \cdot \exp(-\mu(\lambda - \lambda_0)),$$

где  $\kappa_{жв}^{уд}(\lambda_0)$  – удельный показатель поглощения света желтым веществом на длине волны  $\lambda_0$ , м<sup>2</sup>/г;

$C_{жв}$  – концентрация желтого вещества, г/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коэффициент, варьирует в пределах 0,011-0,019 нм<sup>-1</sup>.

Для длины волны  $\lambda_0 = 450$  нм по [8]  $\kappa_{жв}^{уд}(450) = 0,09217$  м<sup>2</sup>/г. Коэффициент  $\mu$  для вод Черного моря по [9]  $\mu = 0,018$  нм<sup>-1</sup>.

Тогда для длины волны  $\lambda = 525$  нм концентрация желтого вещества равна:

$$C_{жв} = \frac{\kappa_{жв}(525)}{\kappa_{жв}^{уд}(450) \cdot \exp(-\mu(525 - 450))}.$$

**Программный модуль.** Интерфейс программного модуля представлен на рисунке 3. В качестве среды программирования выбрана широко используемая система визуального объектно-ориентированного программирования Borland Delphi 6.0 с



программированием на языке Object Pascal [10].

Интерфейс модуля и операции, осуществляемые пользователем при работе с ним, являются стандартными и «привычными» для пользователей, работающих в ОС Windows.

Исходные данные загружаются из текстового файла и отображаются на экране в виде таблицы. Все производимые расчеты также отображаются на экране и могут быть впоследствии сохранены в виде текстового файла.

Для визуального отображения исходных и рассчитанных величин используется отдельное графическое окно, позволяющее изобразить данные в виде графиков по запросу пользователя. Отображаемые графики могут быть сохранены в виде bmp-файлов.

Программный модуль включен в состав программного обеспечения, разработанного для морской прибрежной гидрометеорологической станции БРИЗ. Также модуль может быть использован самостоятельно как отдельный программный продукт.

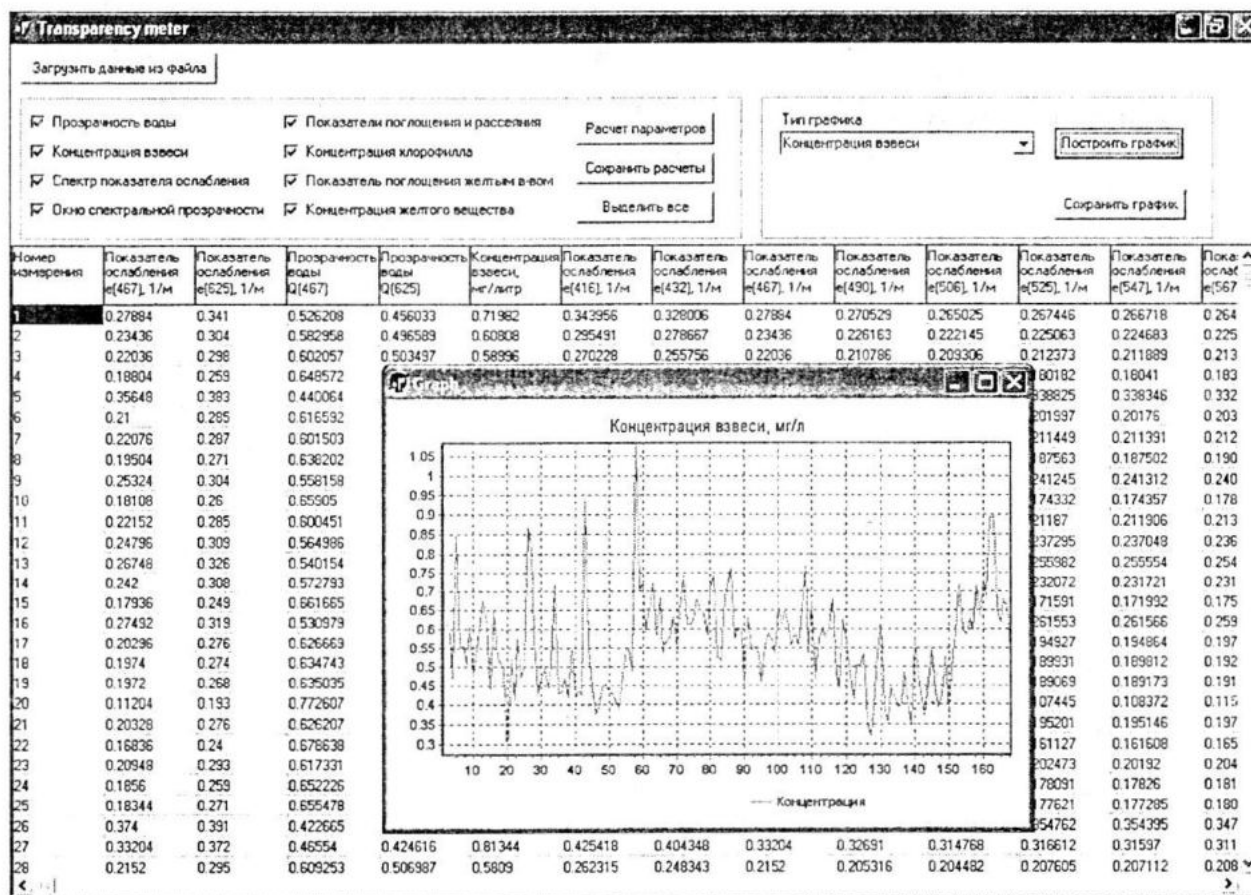


Рисунок 3 – Интерфейс программного модуля

**Выводы.** Представленная информационная технология вторичной обработки и интерпретации данных измерений прозрачности позволяет значительно расширить диапазон получаемых параметров состояния морской среды без установки дополнительного измерительного оборудования.

Достоинством представленной информационной технологии является оперативность получения дополнительной информа-

ции о параметрах морской среды, многие из которых на сегодняшний день определяются только в лабораторных условиях в пробах воды.

Понятно, что достоверность восстановления информации по эмпирическим зависимостям уступает непосредственному измерению или определению параметров среды. Однако данная информационная технология расширяет возможности оперативной

оценки состояния среды по измерениям ограниченного числа оптических параметров.

Информационная технология представляет собой законченный программный продукт, который может быть использован как самостоятельная программа или как подключаемый модуль внутри другого программного обеспечения.

Информационная технология может успешно применяться для оперативного мониторинга состояния морской среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маньковский В. И. Прозрачномер для морской прибрежной станции / В. И. Маньковский, М. Н. Пеньков, А. С. Бондаренко // Сб. науч. тр./ Системы контроля окружающей среды / МГИ НАНУ – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2004. – С.37–39.

2. Маньковский В. И. Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря / В. И. Маньковский, М. В. Соловьев // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь: МГИ НАНУ. – 2003. – № 2. – С. 60–65.

3. Маньковский В. И. О возможности восстановления спектрального распределения показателя ослабления излучения в поверхностных водах Черного моря по измерениям на одной длине волны / В. И. Маньковский, М. В. Соловьев // Сб. науч. тр./ Системы контроля окружающей среды / МГИ НАНУ – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1999. – С.119–124.

4. Маньковский В. И. Вероятность выживания фотона и ее связь с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря / В. И. Маньковский // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь: МГИ НАНУ. – 2005. – № 6. – С. 68–76.

5. Левин И.М. Об оценке вертикального ослабления квантовой облученности в области фотосинтетически активной радиации в Черном море / И.М. Левин, В. П. Николаев // Океанология. – 1992. – Т. 32. – Вып. 2. – С. 240–245.

6. Pope R. M., Fry E. S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – Vol. 36. – № 32. – P. 8710–8723.

7. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А. С. Мониной – М.: Наука, 1983. – С. 163–166.

8. Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances // Thesis Dep. Anal. Mar. Chem., 1979. – Goteburg, 1979. – P. 200.

9. Чурилова Т. Я. Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль-август 2002) / Т. Я. Чурилова, Г. П. Берсенева // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь: МГИ НАНУ. – 2004. – № 4. – С. 39–49.

10. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi 6. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. – 1120 с.