

# СПЕКТРАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРОЗРАЧНОМЕР С ПЕРЕМЕННОЙ БАЗОЙ

*В.И. Маньковский*

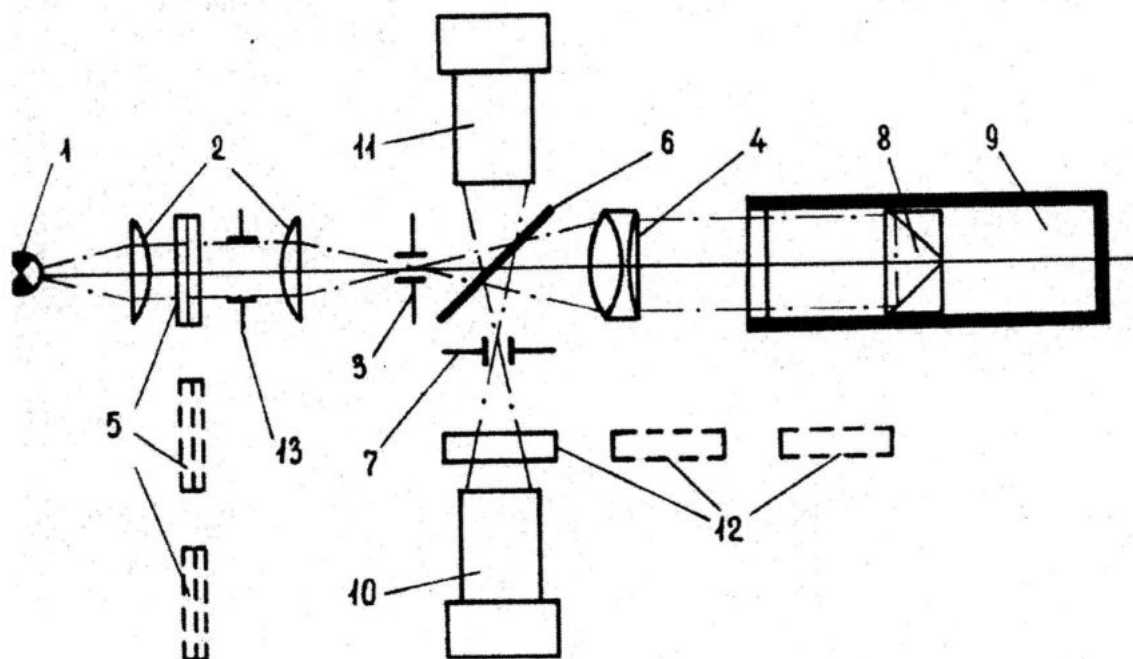
Морской гидрофизический институт  
НАН Украины,  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
[emankovskaya@mail.ru](mailto:emankovskaya@mail.ru)

*Дается описание лабораторного прозрачного измерителя для измерения спектрального распределения показателя ослабления направленного света (ПОС) в 13 участках видимого спектра в диапазоне длин волн от 416 до 677 нм. Приводятся примеры измерения спектрального распределения ПОС в пробах воды, взятых в разных морских водах.*

Лабораторный прозрачный измеритель (ЛПИ) предназначен для измерения в пробах воды спектральных показателей ослабления направленного света. Впервые данный прозрачный измеритель был вкратце описан в работе [1]. В настоящей статье да-

ется более подробное описание его оптической и электронной схем, методики проведения измерений ПОС и приводятся результаты измерений в некоторых водных бассейнах.

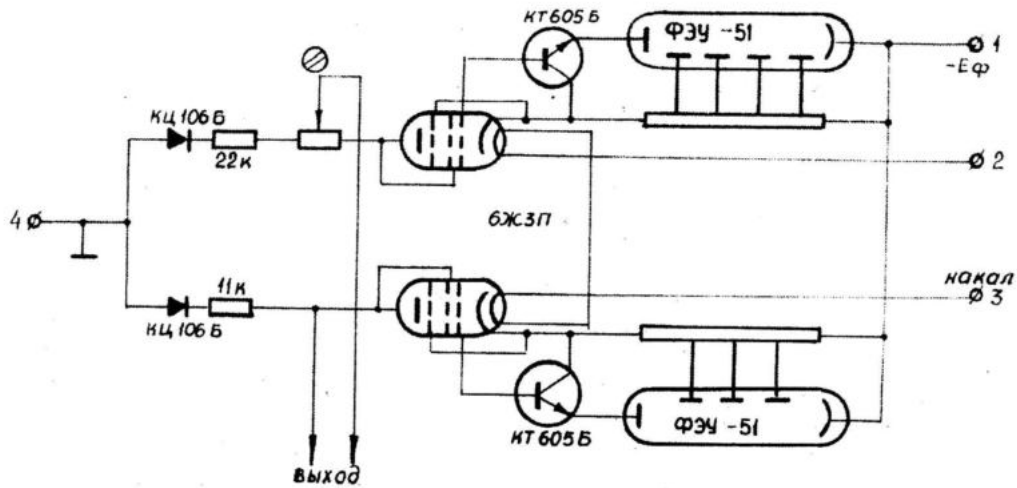
На рис. 1 показана оптическая схема прозрачного измерителя. От осветителя пучок света, пройдя через цветной светофильтр и полупрозрачное зеркало, направляется в кювету с водой, где отражается призмой и направляется на измерительный фотометр. Часть светового пучка отражается от полупрозрачного зеркала, расположенного перед иллюминатором, и направляется на опорный фотометр. Перед измерительным фотометром может устанавливаться калибровочный светофильтр. В качестве отражающего элемента, находящегося в кювете прозрачного измерителя, используется трипельная призма, которая обеспечивает при изменении расстояния призмы от иллюминатора постоянное положение сфокусированного возвратного пучка на входной диафрагме фотоприемника.



Р и с. 1. Оптическая схема прозрачного измерителя: 1 – источник света, 2 – конденсорные линзы, 3 – выходная диафрагма, 4 – объектив, 5 – цветные светофильтры, 6 – полупрозрачное зеркало, 7 – входная диафрагма, 8 – трипельная призма, 9 – кювета, 10 – измерительный фотоумножитель, 11 – опорный фотоумножитель, 12 – нейтральные калибровочные светофильтры, 13 – диафрагма

Фотоэлектронная схема (рис. 2) состоит из двух идентичных фотометров: измерительного и опорного, включенных по мостовой балансной схеме. Каждый из фотометров содержит фотоум-

ножитель типа ФЭУ-51 и лампу 6ЖЗП, включенную последовательно в цепь питания ФЭУ и управляющую, совместно с транзистором КТ605Б, его анодным током.



электрическая схема ЛЛЛ-82

Р и с. 2. Фотоэлектронная схема прозрачномера: 1, 4 – питание фотоумножителей; 2, 3 – питание накала ламп

Параметры фотоэлектронной схемы подобраны таким образом, что общее сопротивление цепи ФЭУ плюс управляющая лампа, составляющих плечо моста, изменяется пропорционально логарифму яркости пучка света падающего на фотокатод ФЭУ. Вследствие этого в диагонали мостовой схемы возникает напряжение пропорциональное разности логарифмов яркости пучков света, падающих на фотокатоды измерительного и опорного ФЭУ:  $V_{\text{вых}} = k_{\text{вых}} (k_{\text{изм}} \lg V_{\text{изм}} - k_{\text{оп}} \lg V_{\text{оп}})$ . Так как величина  $V_{\text{оп}}$  при проведении измерения ПОС постоянна, то изменение выходного сигнала пропорционально изменению логарифма яркости пучка света, падающего на измерительный ФЭУ. На рис. 3 показана одна из градуировок прозрачномера, проводившаяся путем установки перед ФЭУ измерительного фотометра нейтральных светофильтров с разной оптической плотностью.

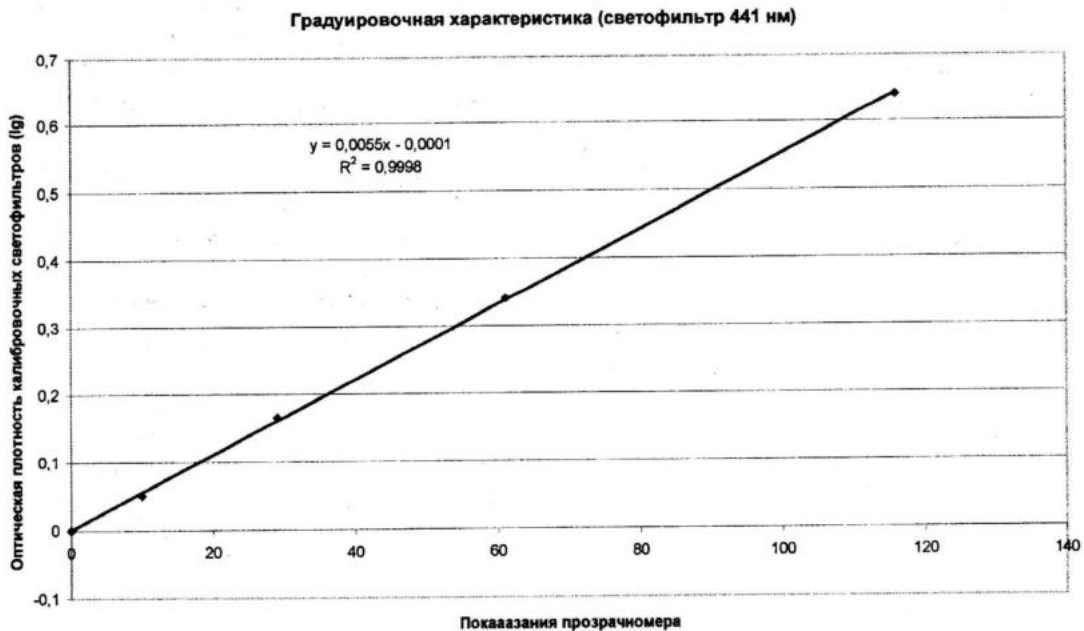
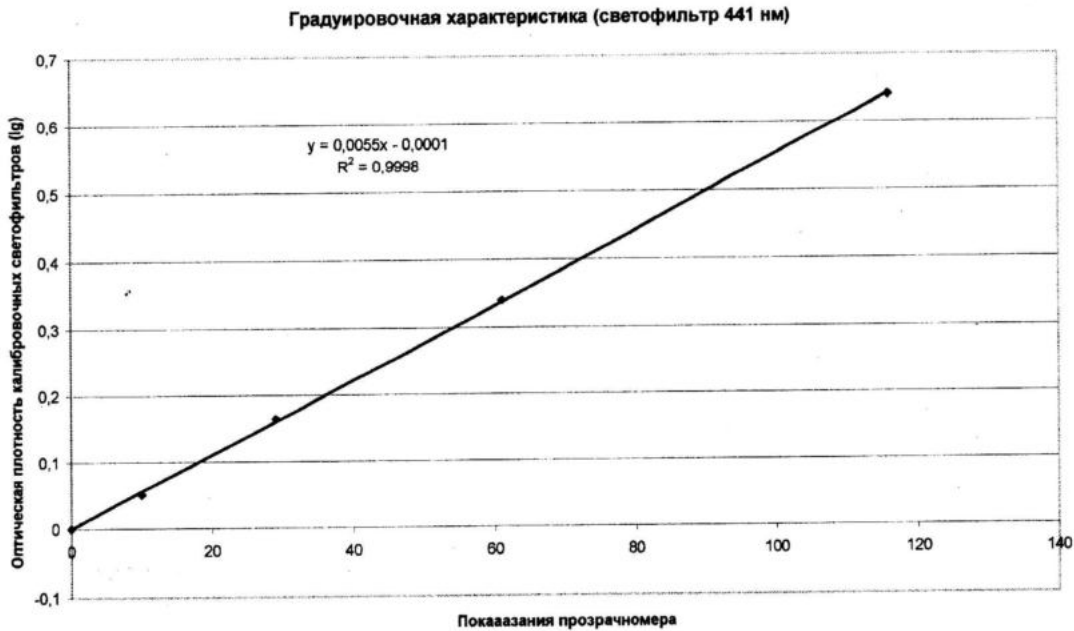
Опорный фотоприемник, при указанном способе его включения в мостовую схему, выполняет две функции. Во

первых, он сводит к минимуму изменение начального напряжения на выходе моста при изменении яркости пучка света во время смены цветных светофильтров. Во вторых, он уменьшает временной дрейф выходного напряжения, так как дрейф опорного ФЭУ примерно такой же, как и у измерительного ФЭУ.

С учетом линейности градуировочных характеристик прозрачномера изменение показателя ослабления производится следующим образом. Отражающая призма устанавливается в кювете в крайнем дальнем положении, при котором световой пучок проходит в воде расстояние  $2L$ , где  $L$  длина кюветы. При этом регистрируется выходной сигнал  $V_{\text{вых}2L}$ . Затем призма устанавливается вплотную к иллюминатору, то есть световой пучок проходит в воде расстояние 0 метров. Регистрируется выходной сигнал  $V_{\text{вых}0L}$ . При нулевом положении призмы перед измерительным фотоприемником устанавливается калибровочный светофильтр с плотностью  $D_k$ . Измеряется выходной сигнал  $V_{\text{вых}D_k}$ .

Введем обозначения:  $B_0$  – яркость пучка света от осветителя,  $T_{изм}$  – коэффициент пропускания пучка света оптическим трактом измерительного фотометра,  $T_{2L}$  – коэффициент пропускания пучка света при прохождении его через воду в кювете на расстоянии  $2L$ ,  $T_{0L}$  – коэффициент пропускания света водой

при положении призмы вплотную к иллиминатору, когда  $L=0$ ;  $T_{оп}$  – коэффициент пропускания света оптическим трактом опорного фотометра,  $T_{Dк}$  – коэффициент пропускания света калибровочным светофильтром с оптической плотностью  $D_k$ .



Р и с 3. Пример градуировочной характеристики прозрачномера в одном из спектральных каналов

Рассмотрим световые потоки при трех состояниях оптической схемы прозрачномера во время проведения измерений. Яркость пучка света, падающего на измери-

тельный ФЭУ, будет составлять: 1) после прохождения пучка света через воду в кювете на расстоянии  $2L$  и другие элементы оптической схемы  $B_{изм2L} = B_0 T_{изм} T_{2L}$ ; 2) при

нулевом положении отражающей призмы  $V_{изм0L}=V_0T_{изм}T_{0L}$ ; 3) при положении призмы  $L=0$  и наличии перед ФЭУ калибровочного светофильтра  $V_{измDk}=V_0T_{изм}T_{0L}T_{Dk}$ .

С учетом логарифмической характеристики измерительного фотометра показания прозрачномера будут

- 1)  $V_{вых2L}=k_{вых}(k_{изм} \lg V_{изм2L}-k_{оп} \lg V_{оп})$ ;
- 2)  $V_{вых0L}=k_{вых}(k_{изм} \lg V_{изм0L}-k_{оп} \lg V_{оп})$ ;
- 3)  $V_{выхDk}=k_{вых}(k_{изм} \lg V_{измDk}-k_{оп} \lg V_{оп})$ .

Коэффициенты пропускания отдельных оптических трактов прозрачномера связаны с их оптической плотностью  $T=10^{-D}$ .

Составим следующую комбинацию из показаний прозрачномера

$$(V_{вых2L}-V_{вых0L})/(V_{выхDk}-V_{вых0L}) \quad (1)$$

Подставляя в выражение (1) вышеприведенные соотношения и учитывая, что  $\lg T=-D$ , получаем

$$(V_{вых2L}-V_{вых0L})/(V_{выхDk}-V_{вых0L})=D_{2L}/D_k \quad (2)$$

Оптическая плотность воды в кювете при прохождении в ней пучка света на расстоянии  $2L$  связана с ее показателем ослабления света соотношением  $D_{2L}=\mathcal{E} 2L$ . Таким образом, для определения  $\mathcal{E}$  получаем формулу

$$\mathcal{E}=[(V_{вых2L}-V_{вых0L})/(V_{выхDk}-V_{вых0L})]D_k/2L \quad (3)$$

Обычно в прозрачномере используется калибровочный светофильтр с оптической плотностью в средней части спектра  $D_k=0,65$  единиц ( $\lg$ ), что достаточно при определении по формуле (3)

показателя ослабления света в большинстве морских вод. При измерении ПОС в очень мутных водах уменьшают в  $N$  раз длину пути светового пучка в кювете, устанавливая соответственно отражающую призму ближе к иллюминатору. Например, уменьшение  $L$  в два раза позволяет измерять величину ПОС порядка  $1,3 \text{ м}^{-1} (\lg)$ .

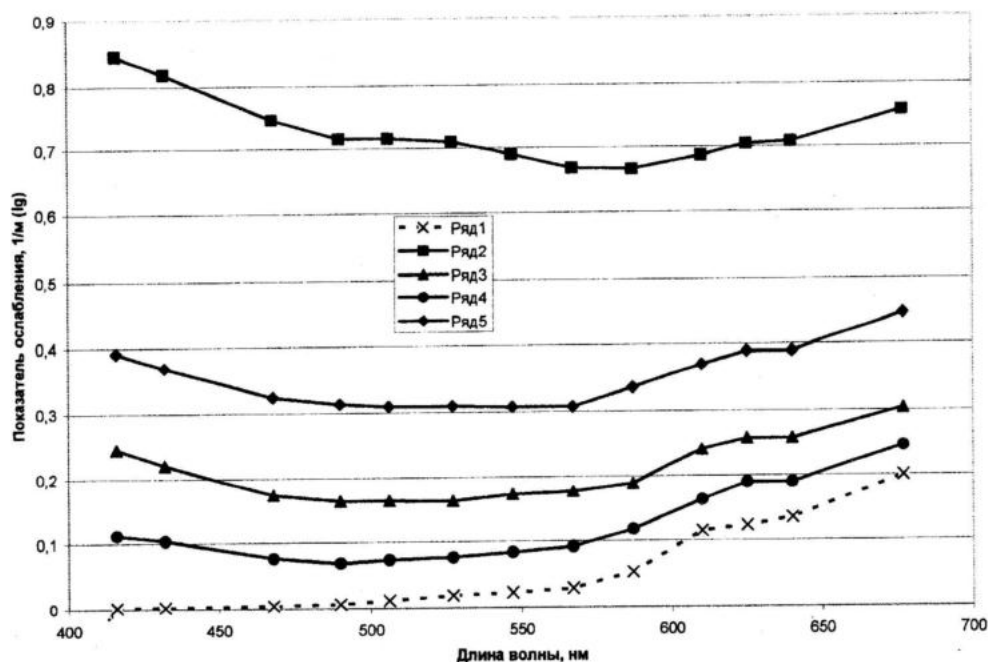
Как видно из описанной процедуры, при каждом измерении ПОС производится градуировка прозрачномера с помощью калибровочного светофильтра. Таким образом устраняются возможные ошибки измерений за счет временного дрейфа характеристик фотоумножителей. Практика показала, что за время измерения ПОС в одном спектральном канале, составляющем около 15 сек, имеющийся медленный дрейф фотоэлектронной схемы не оказывает влияния на результат измерения. Для получения спектрального распределения ПОС аналогичные измерительные процедуры проводятся поочередно с разными цветными светофильтрами.

В табл. 1 приведены технические характеристики прозрачномера. На рис. 4 приведены примеры измерения ПОС в разных морских водах. При измерениях ПОС в мутных водах на северо-западном шельфе Черного моря длина оптической базы прозрачномера была установлена равной 0,5 м. Для сравнения на рис. 4 приведено спектральное распределение показателя поглощения света в чистой воде [1].

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики прозрачномера

№	Характеристика	Величина
1	Спектральный диапазон измерения ПОС, нм	416-677
2	Число спектральных каналов, шт.	13
3	Ширина полосы пропускания спектральных светофильтров, нм	12-15
4	Диапазон измерения ПОС на основной базе, $\text{м}^{-1} (\lg)$	0,02-0,65
5	Погрешность измерения ПОС, $\text{м}^{-1} (\lg)$	0,01
6	Длина основной оптической базы, м	1,05
7	Диапазон изменения оптической базы, м	0,1-1,05
8	Расходимость светового пучка осветителя, угл. мин.	30
9	Поле зрения фотоприемника, угл. мин.	60
10	Объем кюветы, л	1,0
11	Время измерения ПОС в одном спектральном канале, сек	15



Р и с 4. Примеры измерения прозрачномером ПОС в поверхностных водах Черного и Средиземного морей: 1. Чистая вода (показатель поглощения) по [2]. 2. С-3 шельф Черного моря в районе устья Дуная; 3. Центральная часть Черного моря; 4. Центральная часть Эгейского моря; 5. Аппеллинг около о. Сицилия

Описанный в статье прозрачномер использовался для измерений ПОС в экспедициях на судах МГИ. Кроме измерений на дрейфовых станциях с его помощью производились измерения ПОС в пробах воды с поверхности, отбиравшихся на ходу судна, что позволило получить большой массив данных о спектральных характеристиках показателя ослабления направленного света на обширных акваториях различных районов Мирового океана. По данным, полученным с помощью данного прозрачномера, опубликованы работы [3–7] и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маньковский В.И., Кайгородов М.Н. Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой // Автоматизация научных исследований морей и океанов. 5-я всесоюзная школа. – Севастополь: МГИ АН УССР. – 1980. – С. 91 – 92.
2. Pope R. M., Fry E. S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II Integration cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – 36, N. 33. – P. 8710 – 8723.
3. Маньковский В. И., Павловская Т. В., Зесенко А. Я., Земляная Л. А. Связь спектральных показателей ослабления света с концентрацией взвешенного вещества в поверхностных водах тропической Атлантики // Океанология. – 1993. – Т. 33. – № 6. – С. 845 – 850.
4. Маньковский В. И., Соловьев М. В. О возможности восстановления спектрального распределения показателя ослабления излучения в поверхностных водах Черного моря по измерениям на одной длине волны // Системы контроля окружающей среды. – 1999. – Севастополь. – С. 119 – 124.
5. Mankovsky V. I. Spectra of the beam attenuation coefficient in the upper waters of the Mediterranean Sea // Proceedings of III International Conference "Current Problems in Optics of Natural Waters" / St. Petersburg. – 2005. – P. 123 – 127.
6. Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Полуэмпирическая региональная спектральная модель показателя ослабления света для поверхностных вод Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь. – ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2009. – вып. 8. – С. 254 – 261.
7. Маньковский В. И. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря // Морской гидрофиз. журнал. – 2011. – №5. – С. 14 – 29.