

**ВОЗМОЖНЫЕ ОШИБКИ В
ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЯ
ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА
АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМИ
ПРОЗРАЧНОМЕРАМИ С ТРИПШЕЛЬ
ПРИЗМОЙ**

Маньковский В.И.
Морской гидрофизический институт НАН
Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

В данной работе будут рассматриваться прозрачномеры для измерения показателя ослабления света в воде. Показатель ослабления света \mathcal{E} определяется формулой

$$\mathcal{E}, \text{m}^{-1} = 1/L * \text{Log} (B_0/B_L) \quad (1)$$

где: B_0 и B_L яркость светового луча вошедшего в воду и прошедшего в воде путь L . Величину L называют оптической базой прозрачномера.

Ошибки измерения \mathcal{E} уменьшаются при увеличении L , то есть целесообразно увеличивать базу. Чтобы при этом не увеличивались габариты прибора, что особенно важно в зондирующих прозрачномерах, фотоприемник помещают в одном контейнере с осветителем и ставят отражатель, возвращающий луч света назад, в результате чего проходимый им в воде путь увеличивается вдвое.

В качестве световозвращателя в некоторых прозрачномерах, например [1,2], используют трипшель призму, обладающую свойством возвращать световой луч назад точно в одно и то же место при изменении ориентации призмы относительно начального положения. Такое свойство трипшель призмы привлекло разработчиков прозрачномеров тем, что при измерениях, в случае необходимости, можно изменять длину оптической базы L , переставляя призму, не опасаясь при этом смещения возвращающегося луча то есть нарушения юстировки прибора.

Однако в прозрачномерах с трипшель призмой, оптическая схема которых подобно [1] построена по принципу автоколлиматора с одним объективом, играющим одновременно роль выходного и входного, есть существенный недостаток - возникновение паразитных лучей попадающих на фотоприемник вместе с лучом света, прошедшим через измеряемую среду. Этот важный момент для аттестации прозрачномеров с трипшель призмой, построенных по такой схеме, почему-то в литературе не обсуждается и, возможно,

практически не учитывается. Рассмотрим что за этим кроется.

На рис.1 показана принципиальная оптическая схема автоколлимационного прозрачномера с трипшель призмой, использованная в [1]. Прозрачномер построен по принципу логарифмического дифференциального фотометра с одним фотоприемником. Сигнал на выходе прибора пропорционален логарифму отношения яркости измерительного светового луча к яркости внутреннего, так называемого опорного светового луча.

На внутренней и внешней гранях иллюминатора, роль которого играет объектив, и на внешней грани трипшель призмы возникают отраженные лучи - блики. Лучи отраженные от внутренней сферической грани объектива-иллюминатора не попадут в апертурную диафрагму, разойдясь в стороны от нее. При ортогональном расположении внешней грани иллюминатора и внешней грани трипшель призмы относительно светового луча блики от них попадут в апертурную диафрагму и придут на фотоприемник вместе с измерительным лучом, создавая помеху. В результате этого прибор будет измерять отношение

$$S = \text{Log}[(B_L + B_{\text{блик}})/B_{\text{оп}}] \quad (2)$$

где: $B_{\text{оп}}$ - яркость внутреннего опорного луча света, B_L - яркость измерительного луча прошедшего в среде путь L , $B_{\text{блик}}$ - яркость бликов. Как видно из формулы (2), при наличии $B_{\text{блик}}$ снижается чувствительность прибора, а сигнал S , если фотометрическая характеристика прибора относительно измеряемых оптических плотностей линейная, уже не будет связан линейно с \mathcal{E} . Но главное в другом - в этом случае не применима обычная методика градуировки, так как величина $B_{\text{блик}}$ в воздухе и в воде разная.

Градуировку прозрачномеров делают в воздухе с помощью эталонных ослабителей света - нейтральных светофильтров. Чтобы использовать ее для измерения показателя ослабления света в воде, вводят поправку $\delta\mathcal{E}$ на изменение коэффициента отражения света на внешних гранях иллюминатора и световозвращающей призмы при погружении прибора в воду, так называемая поправка на просветление $\delta\mathcal{E}$ [3]. Она рассчитывается по формуле (3) и прибавляется к величине \mathcal{E} определенной по градуировке сделанной в воздухе

$$d_e = 1/L \cdot \text{Log}[(1-r_{\text{вода}})/(1-r_{\text{воздух}})]^m \quad (3)$$

где $r_{\text{вода}}$ и $r_{\text{воздух}}$ - коэффициенты отражения света на границах стекло-вода и стекло-воздух, m - число отражений светового луча на внешних гранях: иллюминатора и световозвращающей призмы. В прозрачномерах без светоотражателя $m = 2$, со светоотражателем $m = 4$.

Величина коэффициента отражения света на границе двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 определяется формулой

$$r_{1,2} = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2 \quad (5)$$

Показатель преломления n_1 стекла, обычно используемого для изготовления оптических элементов при измерении в видимой области спектра, для длины волны света 500 нм равен 1,52. Для той же длины волны света показатель преломления n_2 для воздуха равен 1, а для воды 1,336. Коэффициенты отражения света оптическим стеклом в воздухе и в воде в данном случае составят соответственно: $r_{1,2} = 0,0426$ и $r_{1,2} = 0,00415$. Таким образом, поправка на просветление по формуле (3) для прозрачномера со светоотражателем ($m = 4$) при базе $L = 1\text{ м}$ будет равна $0,068 \text{ м}^{-1}(\text{Log})$.

Преобразуем формулу (2) следующим образом. Обозначим яркость светового луча проходящего от осветителя на внешнюю грань иллюминатора V_0 . Так как источник света для опорного и измерительного лучей один и тот же, величину V_0 можно выразить через $V_{\text{оп}}$

$$V_0 = T_1 V_{\text{оп}} \quad (6)$$

где T_1 - коэффициент пропорциональности. Яркость измерительного луча света проходящего на фотоприемник будет равна

$$V_L = V_0 T_2 T_3 10^{-D} = V_{\text{оп}} T_1 T_2 T_3 10^{-D} \quad (7)$$

где: T_2 - коэффициент пропускания света оптической системой в измерительной базе, учитывающий потери на отражение на внешних гранях иллюминатора и световозвращающей призмы, T_3 - коэффициент светопропускания оптической системой внутри прибора на пути измерительного луча от внешней грани иллюминатора до фотоприемника, D - оптическая плотность измеряемой среды. Величина T_2 рассчитывается по формуле

$$T_2 = (1 - r_{1,2})^m \quad (8)$$

где m - число отражений светового луча на внешних гранях иллюминатора и световозвращающей призмы при прохождении им в измерительной базе прозрачномера в обе стороны (для схемы рис.1 $m=4$).

Будем рассматривать наличие только одного блика - от внешней грани иллюминатора. Его величина выразится так

$$V_{\text{блик}} = V_{\text{оп}} T_1 T_3 r_{1,2} \quad (9)$$

С учетом формул (7-9) формула (2) запишется

$$S = \text{Log}[1/(T_2 10^{-D} + r_{1,2})] + \text{Log}[1/(T_1 T_3)] \quad (10)$$

Второе слагаемое в формуле (10) есть некоторая аппаратная константа, которую можно электрическим либо оптическим путем свести к нулю. В предположении, что это сделано получим формулу

$$S = \text{Log}[1/(T_2 10^{-D} + r_{1,2})] \quad (11)$$

Проанализируем формулу (11), приняв также длину волны излучения 500 нм. Длину оптической базы прозрачномера примем равной одному метру. Так как отражение от внешней грани иллюминатора учитывается формулой (9), при расчете коэффициента пропускания света оптической системой в измерительной базе - T_2 (формула 8) число отражений светового луча принимаем $m = 3$.

В таблице 1 приведены результаты расчетов по формуле (11) показаний прибора в воздухе - $S_{\text{воздух}}$ ($T_2=0,8775$; $r_{1,2}=0,0426$) и в воде - $S_{\text{вода}}$ ($T_2=0,9876$; $r_{1,2}=0,00415$) при различных оптических плотностях среды D в базе прозрачномера (при базе $L=1\text{ м}$ они равны показателю ослабления). В четвертом столбце представлена величина оптической плотности D^* , получающейся, если по показаниям прибора в воде, имеющей оптическую плотность D , определить ее оптическую плотность, используя градуировку сделанную на воздухе. Она получается, если подставить величину $S_{\text{вода}}$ в формулу (11) при значениях $T_2=0,8775$; $r_{1,2}=0,0426$ и ввести при этом, как положено, поправку на просветление по формуле (3), составляющую в данном случае при $m = 3$: $\delta E = 0,051$. В пятом и шестом столбце приведены возникающие при этом ошибки: абсолютная и относительная.

В высокопрозрачных водах с величиной $E = 0,02$, а такие воды встречаются в Мировом океане, ошибка составит 88,5%. В очень часто встречающихся водах с величинами $E = 0,05$ -

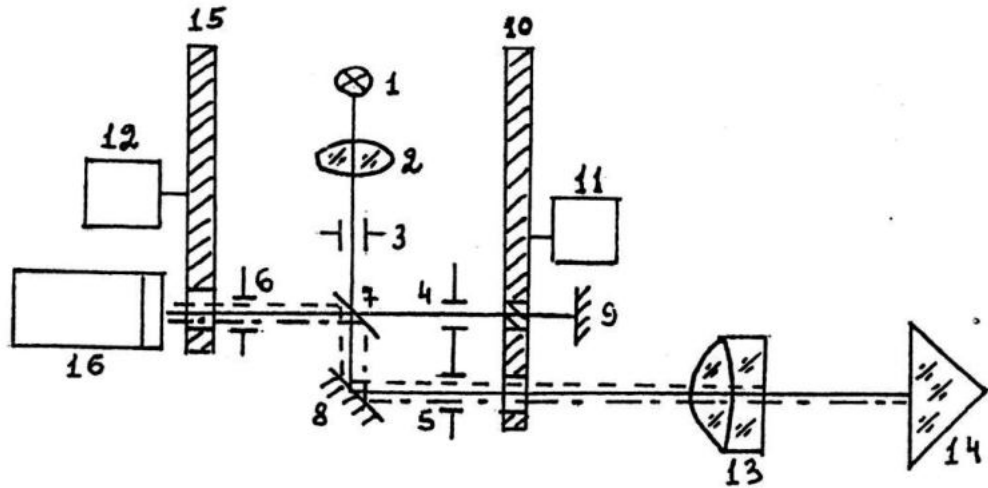


Рис.1. Принципиальная оптическая схема автоколлимационного прозрачномера с трипель призмой [1].

1 - источник света; 2 - линза; 3,4,5,6 - диафрагмы; 7 - светоделительная пластинка; 8,9 - зеркала; 10 - обтюратор; 11,12 - моторы; 13 - объектив; 14 - трипель призма; 15 - диск с интерференционными светофильтрами; 16 - фотоумножитель.

Сплошная линия - основной луч света, пунктирная линия - бликовый луч от внешней грани иллюминатора, пунктирная линия с точками - бликовый луч от внешней грани трипель призмы.

Таблица 1

D	S _{воздух}	S _{вода}	D*	D* - D	100(D* - D)/D
0.02	0.0552	0.0235	0.0377	0.0177	88.5
0.05	0.0837	0.0532	0.0692	0.0192	38.4
0.10	0.1310	0.1031	0.1215	0.0215	21.5
0.20	0.2246	0.2025	0.2273	0.0273	13.7
0.30	0.3166	0.3018	0.3348	0.0348	11.6
0.50	0.4947	0.4997	0.5567	0.0567	11.3
0.70	0.6822	0.6964	0.7940	0.0940	13.4
0.85	0.7785	0.8427	0.9897	0.1397	16.4
1.00	0.8849	0.9875	1.2133	0.2138	21.4

Таблица 2

Метод определения	Оптическая плотность				
	0.160	0.310	0.415	0.535	0.780
Калибровочные светофильтры	0.165	0.315	0.418	0.520	0.750
Измерения с учетом блика	0.120	0.200	0.240	0.270	0.310

0,2 ошибки будут варьировать в пределах 13,7-38,4%. Даже минимальные ошибки 11,3-11,6% для вод с показателями ослабления $0,3-0,5 \text{ м}^{-1}$ существенны.

Таким образом, для корректного определения ПОС прозрачномера с трипель призмой, построенных по автоколлимационной схеме необходимо либо устранять блики от внешних граней иллюминатора и трипель призмы, либо каким-то образом их учитывать.

Методы устранения и учета бликовых помех.

В оптической схеме рис.1 блик от внешней грани трипель призмы можно увести в сторону от апертурной диафрагмы, поставив ее под небольшим углом к световому лучу. Таким же образом можно избавиться от блика возникающего на внешней грани иллюминатора, сделав эту грань скошенной. В том случае, если переделка уже готового иллюминатора затруднена, бликовая помеха, может быть учтена по методу, разработанному для автоколлимационного прозрачномера с трипель призмой, установленного в зондирующем комплексе ШИК [4].

В этом прозрачномере используется однолучевая схема. Сигнал с выхода фотоприемника N, прямо пропорциональный яркости приходящего на него измерительного луча света, передается в виде кодов в линию связи. В бортовом устройстве вычисляется показатель ослабления по формуле (1).

Учет бликовой составляющей производится следующим образом. Определяется величина сигнала от блика на воздухе. Для этого вплотную к иллюминатору ставится зеркало примерно под углом 45 градусов, уводящее вышедший из иллюминатора луч света в сторону от светоотражателя. В этом случае на фотоприемник приходит только свет отраженный от внешней грани иллюминатора, дающий сигнал $N_{\text{блик-возд}}$. Затем определяется сигнал $N_{\text{блик-вода}}$. Зеркало таким же образом помещается около иллюминатора, который погружают в чистую воду, налитую в небольшой стаканчик с зачерненными стенками. Показатель ослабления света водой вычисляется по формуле

$$E, \text{м}^{-1} = 1/L * \text{Log}[(N_0 - N_{\text{блик-возд}})/(N_D - N_{\text{блик-вода}})] + \delta E \quad (12)$$

где: N_0 - показания прибора на воздухе, N_D - показания прибора в воде, имеющей

оптическую плотность D в базе прибора, δE - поправка на просветление.

Таблица 2 иллюстрирует правильность определения и учета величины $N_{\text{блик-возд}}$ в прозрачномере, проверявшуюся на воздухе. Оптические плотности светофильтров, с помощью которых ослаблялся световой пучок, равны в пределах ошибок измерений и паспортных данных на светофильтры оптическим плотностям вычисленным по формуле (13)

$$D = \text{Log}[(N_0 - N_{\text{блик-возд}})/(N_D - N_{\text{блик-возд}})] \quad (13)$$

Оптические плотности вычисленные без учета бликового сигнала значительно ниже плотностей калибровочных светофильтров и к тому же видна большая нелинейность характеристики. Отметим также, что бликовая составляющая в данном приборе значительно превышала расчетную от внешней грани иллюминатора, что свидетельствовало о наличии еще каких-то бликов внутри прибора попадающих на фотоприемник.

Более сложный метод учета бликовой составляющей используется в прозрачномере зондирующего комплекса ОГХ [5], построенном по схеме логарифмического дифференциального фотометра с одним фотоприемником. Особенностью данного прозрачномера является то, что сигналы с ФЭУ от измерительного и опорного световых лучей идут на схему логарифмирования их отношения в погружаемом устройстве по разным трактам.

Таким же методом, как и в прозрачномере зондирующего комплекса ШИК, луч света выходящий из иллюминатора в воздухе и в воде уводится с помощью зеркала в сторону от трипель призмы и вольтметром измеряются соответствующие бликовые сигналы поступающие с выхода ФЭУ в измерительный тракт. В этом тракте до схемы логарифмирования ставится две вычитающие микросхемы. При градуировке прозрачномера на воздухе включается микросхема вычитающая сигнал $N_{\text{блик-воздух}}$, при измерениях в воде включается микросхема вычитающая сигнал $N_{\text{блик-вода}}$. Таким образом, градуировка сделанная на воздухе может непосредственно использоваться для определения показателя ослабления света в воде с добавлением, как положено, поправки на просветление.

Заключение.

Построение прозрачномеров с трипель призмой по схеме автоколлиматора без устранения или учета бликовых помех и

использовании традиционного метода градуировки на воздухе с помощью нейтральных светофильтров может приводить к большим ошибкам в определении показателя ослабления света, особенно в прозрачных водах.

В заключение укажем, что сложности с бликовыми помехами не будут возникать если прозрачномер, в котором в качестве светоотражателя решено использовать трипель призму, строить не по схеме автоколлиматора, а разносить в пространстве выходящий и возвращающийся световые лучи с соответствующими объективами для каждого из них.

Литература.

1. Ли М.Е. Погружаемый автоколлимационный прозрачномер. // Оптические методы изучения океанов и

внутренних водоемов, 7-й Пленум РГ "Оптика океана", Таллин, 1980, с.291-295.

2. Винокуров В.В., Мигуля В.В., Прихач А.С., Шипкин Д.И. Модульный прозрачномер-стратификатор "ОПТРОН-2" // Оптика моря и атмосферы, 10-й Пленум РГ "Оптика океана", Ленинград, 1988, с.118-119.

3. Афонин Е.И., Спиридонов В.В. К методике градуировки фотометров для измерения показателя ослабления направленного света // Морские гидрофизические исследования, МГИ НАНУ, Севастополь, 1972, с.96-105.

4. Шельфовый измерительный комплекс (ШИК) // Техническое описание опытного образца, СКТБ МГИ НАНУ, Севастополь, 1994.

5. Оптико-гидролого-химический комплекс (ОГХ) // Техническое описание опытного образца, СКТБ МГИ НАНУ, Севастополь, 1994.