

Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской водой в мутных водах арктических морей

В.И. БУРЕНКОВ¹, С.В. ШЕБЕРСТОВ, В.А. АРТЕМЬЕВ, В.Р. ТАСКАЕВ

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

¹E-mail: bur-07@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена оценке погрешности определения показателя ослабления света морской водой методом Монте-Карло. Измерения показателя ослабления света и его вертикального распределения являются наиболее распространённым видом гидрооптических наблюдений, так как он широко используется для изучения распространения света в морской среде. Кроме того, показатель ослабления тесно связан с концентрацией взвешенного вещества и может использоваться для её оценки. Как правило, измерения показателя ослабления проводятся при небольшой базе прибора в достаточно прозрачных водах. При этом методические погрешности определения показателя ослабления невелики. Однако на практике встречаются случаи очень мутных вод (придонные нефеловидные слои), где погрешности измерения показателя ослабления существенно возрастают из-за многократного рассеяния в пределах базы прибора. Оценки таких погрешностей и рассматриваются в настоящей работе. Наиболее подробно рассмотрено влияние индикатрисы рассеяния на рассматриваемые погрешности. Кроме того, изучено влияние на погрешности измерения показателя ослабления длины базы прибора и угла зрения приёмной системы. Даны соответствующие оценки.

Ключевые слова: показатель ослабления света, нефеловидные слои, метод Монте-Карло, погрешность измерения, закон Бугера, многократное рассеяние.

1. Введение

Измерения показателя ослабления света морской водой c и его вертикального распределения в настоящее время являются наиболее распространённым видом гидрооптических наблюдений.

Величина показателя ослабления (вместе с другими гидрооптическими параметрами) существенно влияет на распространения солнечного излучения (и излучения искусственных источников света) в водной толще.

Как показали многочисленные наблюдения, величина показателя ослабления достаточно тесно связана с концентрацией взвешенного вещества и может использоваться для её оценки [1, 2]. Здесь следует отметить, что гидрооптические измерения имеют определённое преимущество, поскольку они проводятся непрерывно в пространстве и времени, в то время как геологические методы требуют продолжительного времени.

Отметим, что в последнее время измерения показателя ослабления широко используются для изучения различных биогеохимических процессов в океане (из последних публикаций см., например, [3–5]).

Метод измерения показателя ослабления света основан на законе Бугера $P = P_0 \cdot e^{-cL}$, где P_0 и P – световые потоки до и после прохождения света в воде расстояния L , c – величина показателя ослабления. Для корректного определения величины c необходимо, чтобы выходящий из прибора световой

пучок имел малую расходимость, а приёмная система имела малый угол зрения. В достаточно прозрачных водах величина $\tau = c \cdot L$ относительно невелика, однако бывают ситуации, когда она существенно больше единицы (например, в мутных водах в районах речных стоков или в придонных нефеловидных слоях), и в этом случае необходимо учитывать многократное рассеяние света вдоль оси пучка. Этой цели главным образом и посвящена настоящая работа. Отметим, что применение метода Монте-Карло для оценки погрешности измерения показателя ослабления выполнено впервые.

2. Прозрачномер ПУМ. Оптическая схема и характеристики прибора

На рис. 1 показана оптическая схема прозрачномера ПУМ (прозрачномер универсальный малогабаритный), который в последнее время используется в экспедиционных исследованиях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [6].

Прибор построен по классической двухканальной оптической схеме с одним источником света и одним фотоприёмником, опорный канал находится внутри корпуса. Основным преимуществом двухканальной оптической схемы является то, что при нормировке уровня измерительного сигнала по опорному (что необходимо для расчёта показателя ослабления) исключаются нестабильности источника света и фотоприёмника.

В измерительном канале, излучатель 1, в качестве которого используется мощный светодиод, через полу-

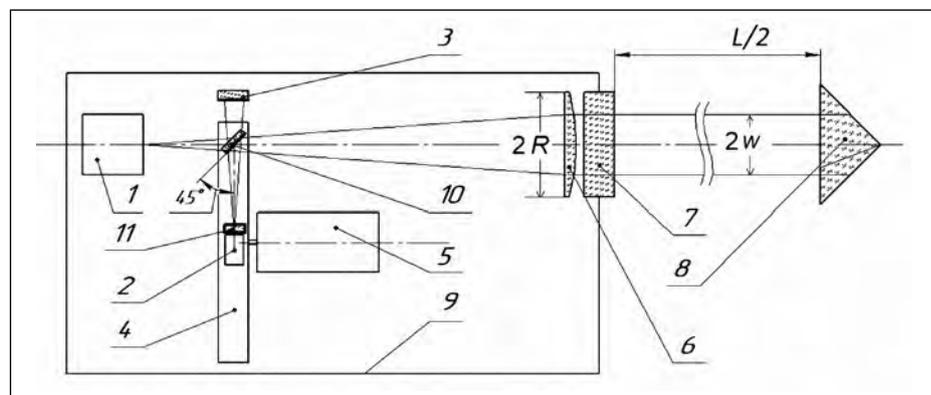


Рис. 1. Оптическая схема прозрачномера ПУМ: 1 – излучатель, 2 – фотоприёмник, 3 – сферическое зеркало, 4 – оптический модулятор, 5 – электродвигатель, 6 – коллиматор, 7 – иллиуминатор, 8 – триппель-призма, 9 – герметичный корпус прибора, 10 – полупрозрачное зеркало, 11 – интерференционный фильтр

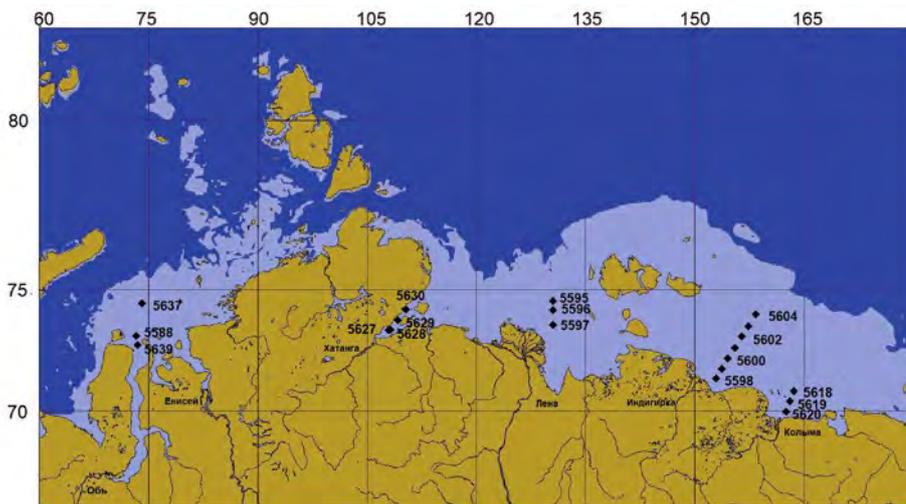


Рис. 2. Станции 69-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш»

прозрачное зеркало 10, коллиматор 6 и иллюминатор 7 посылает луч света в исследуемую среду (морскую воду). Отражённый трипсель-призмой 8 луч через иллюминатор 7 опять поступает внутрь прибора, проходит через объектив 6 и, отразившись от полупрозрачного зеркала 10, поступает на фотоприёмник 2. В опорном канале луч света через полупрозрачное зеркало 10 поступает на сферическое зеркало 3, отразившись от которого он через это же полупрозрачное зеркало также поступает на фотоприёмник, на входе которого стоит интерференционный фильтр 11, пропускающий излучение с длиной волны излучателя (532 нм) и имеющий полосу пропускания с шириной 20 нм.

Для расчёта показателя ослабления используются 2 дополнительных канала. Канал темного сигнала предназначен для расчёта фонового сигнала при выключенном излучателе и используется для компенсации температурного дрейфа фотоприёмника (фоновый сигнал при этом вычитается из опорного сигнала). Канал засветки используется для расчёта фонового сигнала (сигнала засветки) от рассеянного водой света, который попадает в измерительный канал. Сигнал засветки измеряется при выключенном излучателе и вычитается из сигнала измерительного канала. Для дополнительного уменьшения уровня внешней засветки используется узкополосный интерференционный фильтр 11, согласованный по спектральным характеристикам с излучателем. Формирование и последовательность поступления световых потоков четырёх каналов на

вход фотоприёмника 2 обеспечивает оптический модулятор 4, установленный на оси электродвигателя 5. Кроме перекрытия оптических потоков, модулятор формирует синхроимпульсы, управляющие включением излучателя 1 и позволяющие выделить из импульсного сигнала на выходе фотоприёмника составляющие, соответствующие световым потокам в каждом из четырёх каналов.

За время эксплуатации прозрачномера ПУМ неоднократно модернизировался. В частности, помимо места стандартной установки трипсель-призмы на расстоянии $L/2=30$ см от иллюминатора, для измерения в очень мутных водах предусмотрена установка трипсель-призмы на расстоянии $L/2=5$ см.

Основные оптические параметры прозрачномера ПУМ:

- | | |
|------------------------|---------------------------------------|
| Расходимость пучка: | $2 \cdot \theta_0 = 12'$
(в воде). |
| Угол зрения приёмника: | $2 \cdot \theta = 20'$. |
| Ширина пучка: | $2w = 20$ мм. |
| Короткая база: | $L = 10$ см. |
| Длинная база: | $L = 60$ см. |
| Диаметр коллиматора: | $2 \cdot R = 35$ мм. |

3. Примеры измерений вертикальных профилей показателя ослабления в водах высокой мутности

Представленные ниже измерения были выполнены в 69-ом рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» в 2017 г. Район исследований был обширным – от

Баренцева до Восточно-Сибирского моря.

Распределению показателя ослабления в рассматриваемых водах свойственна высокая пространственно-временная изменчивость. Здесь наблюдаются как воды, приближающиеся по величине c к прозрачным океанским, так и сильно замутнённые воды, в которых величина $\tau = c \cdot L$ существенно больше единицы. Положение станций, где были обнаружены anomalно высокие значения c ($c > 10 \text{ м}^{-1}$), показано на рис. 2.

Как правило, такие воды наблюдаются в придонных слоях (так называемые придонные нефелоидные слои, вызванные взмучиванием донных осадков). В устье реки Хатанги вода anomalно мутная ($c > 40 \text{ м}^{-1}$) от поверхности до дна. Примеры результатов измерений, проведённых в таких водах, приведены на рис. 3.

Как видно на рисунке, на всех графиках присутствуют придонные нефелоидные слои, где значения показателя ослабления c превышают 20 м^{-1} (в отдельных случаях величина c превосходила 50 м^{-1}). Очевидно, что для таких слоёв надо принимать во внимание многократное рассеяние света на длине базы L . Во всех случаях, когда величина τ оказывалась больше чем 9, чувствительность прибора с длинной базой оказывалась недостаточной, тогда как измерения с короткой базой давали удовлетворительный результат (рис. 3).

Измерения вертикального распределения показателя ослабления в придонных слоях хорошо подтверждаются прямыми измерениями концентрации взвеси. Соответствующий пример приведён на рис. 3б.

4. Использование метода Монте-Карло для оценки погрешностей определения показателя ослабления

В качестве параметра оценки погрешности была выбрана величина $\delta c = c - c_{meas}$, где $c_{meas} = \ln(P_0/P)/L$. В [7] рассматривалась задача о распространении узкого пучка света, сводящаяся, по существу, к вычислению величины P в зависимости от параметров R , L и оптических свойств среды. Однако надо отметить отличие в постановке задачи по сравнению с нашим случаем: изучалось распределение облучённости

на некотором расстоянии от источника, т.е. угол зрения приёмника θ был равен 90° , тогда как в нашем случае $\theta = 10'$, и, как будет показано ниже, это отличие весьма существенно.

Погрешность определения показателя ослабления c , обусловленная попаданием в приёмник рассеянного света, рассчитывалась методом Монте-Карло. Использовался простейший вариант этого метода – прямое моделирование траекторий фотонов [8, 9]. Для каждого фотона моделировались процессы поглощения и рассеяния в среде, отражение от трипель-призмы, попадание обратно в иллюминатор. При этом учитывались только те фотоны, для которых угол падения не превосходил величины θ .

Рассмотрим сначала зависимость параметров расчёта от индикатрис рассеяния. В отличие от задач дистанционного зондирования, где результат определяется, в основном, поведением индикатрисы в задней полусфере, здесь наиболее существенно рассеяние на малые углы порядка 1° , которое определяет попадание рассеянного света на фотоприёмник. Зависимость результатов расчётов от индикатрисы рассеяния, в отличие от других рассматриваемых ниже параметров, которые заранее известны или задаются априори, наиболее неопределённая. Здесь приходится использовать только литературные данные.

Экспериментальные данные по индикатрисам рассеяния, измеренным в Индийском океане на глубинах меньше чем 100 м и больше чем 100 м, содержатся в монографии «Оптика океана», том 1, часть II, глава 7 [10]. В дальнейшем эти индикатрисы будем обозначать как $ind1$ и $ind2$ соответственно.

В той же монографии в табл. 8.6 приведены индикатрисы для чистой воды и для мелкой и крупной взвеси. Для крупной фракции (биогенная взесь) спектр размеров частиц принимался в виде распределения типа Юнге $r^{-\nu}$, где $\nu = 3$. Показатель преломления частиц равен 1,03. Для мелкой взвеси (терригенная взесь) принималось составное распределение в диапазоне радиусов частиц от 0,01 до 1,3 мкм. Показатель преломления частиц в этом случае равен 1,15. Индикатрисы рассеяния для крупной и мелкой фракций будем обозначать, соответственно, как Kl и Ks .

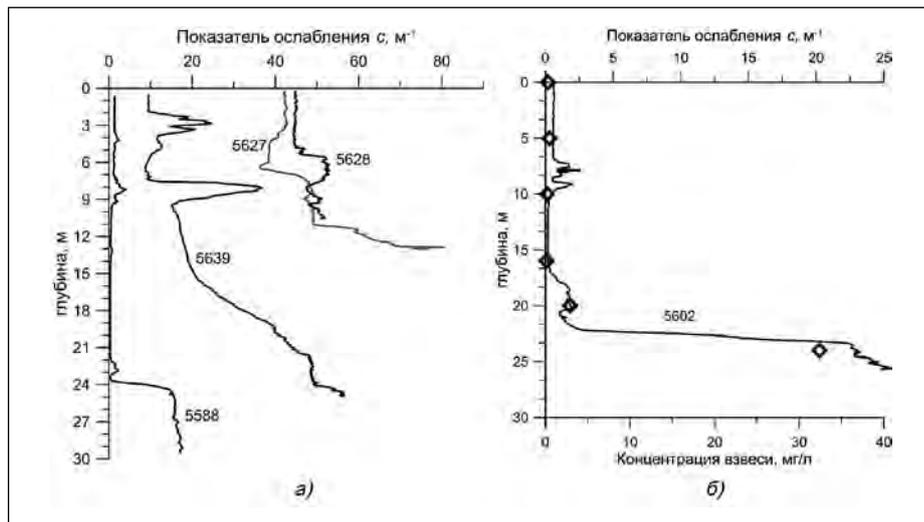


Рис. 3. Примеры измерений вертикальных профилей показателя ослабления света в водах высокой мутности. Номера станций указаны на графиках. а – ст. 5627 и 5628 – устье р. Хатанги, ст. 5588 и 5639 – Карское море; б – ст. 5602 – Восточно-Сибирское море в районе устья р. Индигирки. Ромбами показана концентрация взвеси. Хорошо виден мощный придонный нефелоидный слой

В [11] приведены результаты измерения индикатрисы рассеяния в прибрежных водах (залив Сан Диего) и в водах открытого океана в диапазоне углов от $0,1$ до 175° . (Эти данные воспроизведены в книге [12] и на сайте <http://www.oceanopticsbook.info/view/references/publications>).

Если предположить, что единственным существенным параметром, имеющим размерность длины, в данной задаче является величина L , то для заданной индикатрисы безразмерная величина $\delta c \cdot L$ зависит только от безразмерного параметра $\tau = c \cdot L$. График такой зависимости представлен на рис. 4. Можно заметить, что при достаточно больших значениях параметра τ для некоторых индикатрис, в частности, для индикатрисы Kl , это предположение не выполняется – при одинаковом значении параметра τ величина $\delta c \cdot L$ для длинной базы меньше, чем для короткой. Причина заключается в том, что кроме параметра L , в задаче имеются и другие параметры, имеющие размерность длины, в частности, радиус коллиматора R . Зависимость величины δc от параметра R существенна при $R < L \cdot \operatorname{tg} \psi$, где ψ – угол расходимости пучка фотонов, падающих на мишень под углом, меньшим угла зрения приёмника θ . Величина угла ψ существенно зависит от индикатрисы рассеяния – чем сильнее вытянута вперёд индикатриса, тем меньше этот угол. Условие $R > L \cdot \operatorname{tg} \psi$ при короткой базе выполняется для лю-

бых индикатрис, тогда как при длинной базе это не всегда так.

Зависимости величины δc от угла зрения приёмника для различных индикатрис приведены на рис. 5. Для прибора ПУМ этот угол составляет $0,167^\circ$. Сама по себе эта зависимость достаточно очевидна: чем больше угол зрения приёмника по сравнению с расходимостью пучка, тем больше влияние рассеянного света и тем больше погрешность определения показателя ослабления

Выполненные расчёты показывают, что изменения величины расходимости пучка слабо влияют на величину погрешности определения c (естественно, если расходимость пучка существенно меньше угла зрения приёмника). Кроме того, расчёты показывают, что изменение ширины пучка слабо влияет на результаты (если она существенно меньше диаметра иллюминатора).

Отметим, что величина поглощения, естественно, не влияет на отклонение от закона Бугера. Её увеличение приводит лишь к уменьшению относительной погрешности определения показателя ослабления.

5. Оценка погрешностей определения показателя ослабления в поверхностных слоях арктических морей

Выше было продемонстрировано весьма существенное влияние индикатрисы рассеяния в области ма-

Рис. 4. Зависимости $\delta c \cdot L$ от оптической толщины для различных индикатрис: 1 – *ind1*, 2 – *ind2*; 3 – *Kl*, 4 – *Ks*, 5 – *Petzold*. Сплошные линии – короткая база (0,1 м), штриховые линии – длинная база (0,6 м)

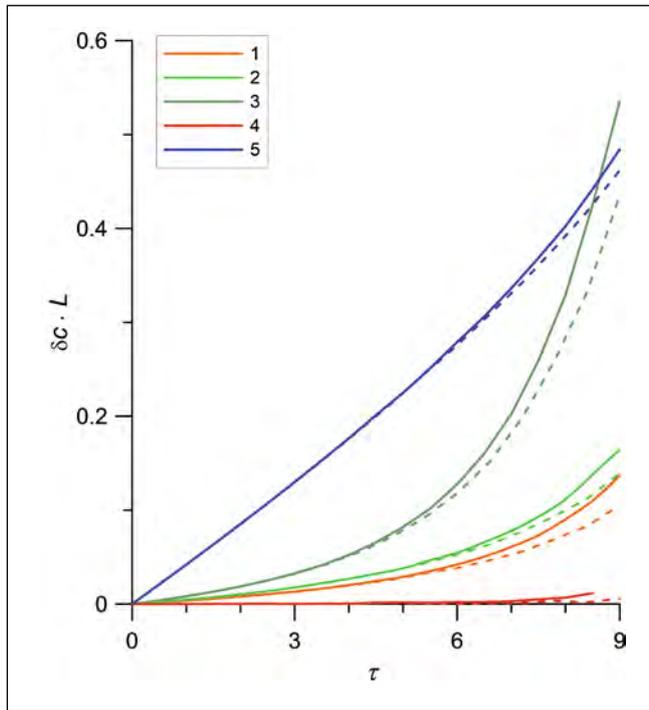
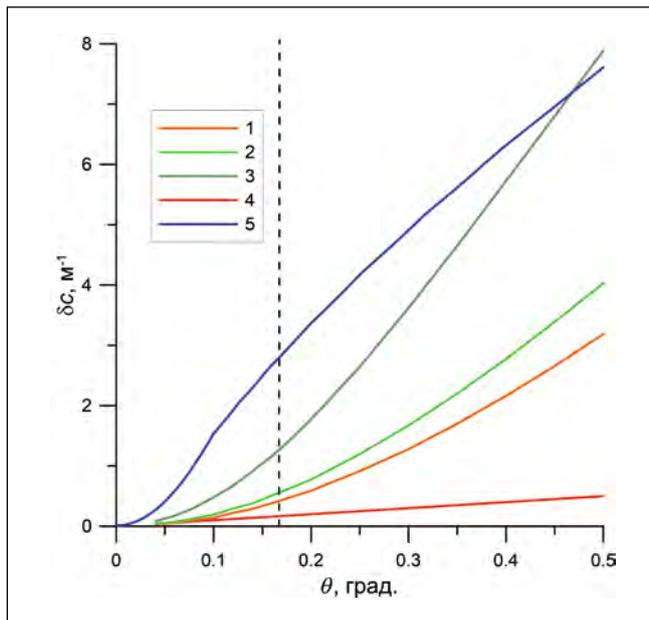


Рис. 5. Зависимости величины δc от угла зрения приёмника θ для различных индикатрис: 1 – *ind1*, 2 – *ind2*; 3 – *Kl*, 4 – *Ks*, 5 – *Petzold*. Вертикальная штриховая линия показывает значение параметра θ для прибора ПУМ



лых углов на погрешность определения показателя ослабления. Ниже мы рассмотрим возможность определения ошибки показателя ослабления в поверхностном слое с учётом индикатрисы рассеяния. Эта возможность основана на тесной связи между показателем рассеяния назад $b_b = 2 \cdot \pi \cdot b \cdot \int_{\pi/2}^{\pi} b_{s,i}(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma$, где b – показатель рассеяния морской воды, и коэффициентом яркости водной толщи $\rho = \pi \cdot L_u / E_d$, где L_u – яркость восходящего излучения, E_d – облучённость, создаваемая нисходящим потоком

излучения – непосредственно под поверхностью моря, $\rho(\gamma)$ – индикатриса рассеяния. Измерение коэффициента яркости водной толщи может быть выполнено как контактными, так и дистанционными (с помощью спутниковых сканеров цвета) методами.

Простое и в то же время достаточно точное выражение, описывающее зависимость коэффициента яркости моря от первичных гидрооптических характеристикам, приведено в [13]: $\rho = 0,0922 \cdot \pi \cdot b_b / a$, где a – показатель поглощения морской воды, откуда

$$b_b = 3,45 \cdot \rho \cdot a. \quad (1)$$

Соотношение между показателями поглощения a и ослабления c получено по данным измерений, проведённых в Баренцевом море в 1998 г. (измерения выполнялись как в мутных водах Печорского моря, так и в относительно прозрачных водах западной части Баренцева моря). При этом проводились одновременные измерения показателя диффузного ослабления облучённости K_d на длине волны 530 нм и показателя ослабления c . Согласно [14], соотношение между a и K_d имеет вид $K_d = D_0(\theta) \cdot k_1 \cdot (a + b_b)$. Учитывая, что измерения проводились при зенитных углах Солнца около 60° , можно принять для приближённых расчётов $D_0(\theta) \cdot k_1 = 1,3$ (см. [14, табл. 4]). Отсюда определяется величина $a(530)$ (величина b_b может быть оценена из приближённой формулы $b_b = 0,018 \cdot c / b$ [15]). График зависимости показателя поглощения от показателя ослабления по данным измерений, проведённых в Баренцевом море в 1998 г., приведён на рис. 6. Как видно, наблюдается достаточно тесная корреляция между рассматриваемыми параметрами (коэффициент детерминации $r^2 = 0,9$). Соответствующее уравнение регрессии имеет вид $a(530) = 0,0983 \cdot c(530) + 0,05$, откуда с учётом (1) получаем:

$$\begin{aligned} b &= 0,902 \cdot c - 0,05, \\ b_b &= \rho \cdot (0,335 \cdot c + 0,252). \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки индикатрисы рассеяния использовалась двухпараметрическая модель светорассеивающих свойств морской воды [16], согласно которой показатель рассеяния на угол γ $b(\gamma)$ может быть представлен как сумма вкладов от рассеяния чистой морской водой $b_w(\gamma)$ и мелкой и крупной взвесей ($b_s(\gamma)$ и $v_l \cdot b_l(\gamma)$ соответственно):

$$b(\gamma) = b_w(\gamma) + v_s \cdot b_s(\gamma) + v_l \cdot b_l(\gamma), \quad (3)$$

где v_s и v_l – объёмные концентрации мелкой и крупной взвесей соответственно; таблицы функций $b_w(\gamma)$, $b_s(\gamma)$ и $b_l(\gamma)$ для длины волны 550 нм приведены в [10]. Для пересчёта к рабочей длине волны прозрачного моря используем формулы для спектральной зависимости: $b_w \sim \lambda^{-4,3}$, $b_s \sim \lambda^{-1,7}$, $b_l \sim \lambda^{-0,3}$.

Для нахождения параметров модели v_s и v_l проинтегрируем (3) сначала по всей сфере, а затем по задней полусфере. В результате получится пара

линейных уравнений с двумя неизвестными

$$b = b_w + v_s b_s + v_l b_l; b_b = \frac{1}{2} b_w + v_s b_{bs} + v_l b_{bl} \quad (4)$$

где b_w – показатель рассеяния чистой

морской воды, $b_{s,l} = 2\pi \int_0^\pi b_{s,l}(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma$,

$$b_{bs,l} = 2\pi \cdot \int_{\pi/2}^\pi b_{s,l}(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma.$$

Решая уравнения (4) с учётом (1) и (2), подставляя полученные параметры v_s и v_l в (3) и умножая результат на нормировочный множитель $4\pi/b$, получаем индикатрису рассеяния, а следовательно, и все параметры, необходимые для расчёта методом Монте-Карло.

На рис. 7 показаны результаты оценки зависимости ошибки измерения показателя ослабления, обусловленной многократным рассеянием, от коэффициента яркости водной толщи для различных значений параметров L и c . Здесь, как и на рис. 4, отличие значений безразмерного параметра $\delta c \cdot L$ для одинаковых значений τ , но различных L , обусловлено тем, что при длинной базе величина $L \cdot \tan(\psi)$ (ψ – угол расхождения светового пучка) превышает радиус коллиматора.

Оценка ошибки измерения показателя ослабления c использованием параметра ρ возможна только для приповерхностных слоёв. Возможные значения величины ρ для данного региона можно оценить по спутниковым данным или данным контактных измерений, например, с помощью плавающего спектрорадиометра [17]. В 69-ом рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» интересные нас приповерхностные слои повышенной мутности были отмечены на станциях 5627 и 5628 в устье реки Хатанги (рис. 2, 3). Судовые измерения ρ на этих станциях не выполнялись. Возможность оценки этого параметра с помощью спутниковых данных рассмотрена ниже.

Файлы данных спутниковых сканеров цвета океана *MODIS Aqua* и *MODIS Terra* содержат параметр $R_{rs}(\lambda) = L_u^+/E_d^+$ (L_u^+ – яркость восходящего излучения, E_d^+ – облучённость, создаваемая нисходящим потоком над поверхностью) для длины волны $\lambda = 531$ нм. Величина ρ с хорошей точностью может быть вычислена

Рис. 6. Связь между показателями поглощения и ослабления в Баренцевом море (1998 г.)

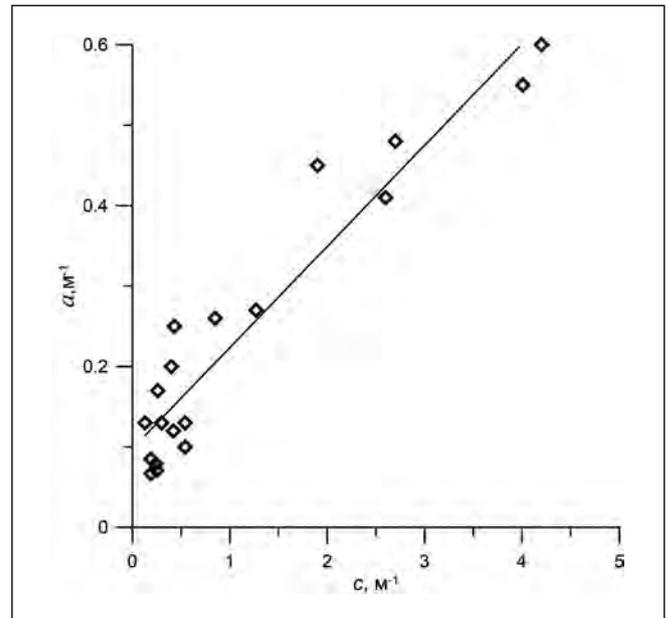
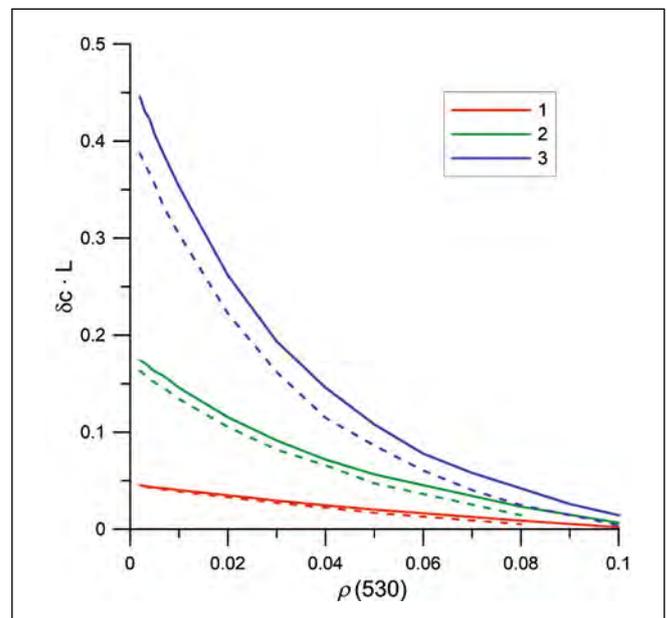


Рис. 7. Зависимость ошибки оценки показателя ослабления, обусловленной многократным рассеянием, от коэффициента яркости водной толщи: 1 – $\tau = 3$; 2 – $\tau = 6$; 3 – $\tau = 8$. Сплошные линии – $L = 0,1$ м, штриховые линии – $L = 0,6$ м



по формуле $\rho(\lambda) = R_{rs}(\lambda)/(0,495 \cdot R_{rs}(\lambda) + 0,165)$ [18]. Данные с точной привязкой к координатам и времени измерения для станций 5627 и 5628 отсутствуют, однако можно предположить, что искомое значение ρ лежит в интервале между минимальным и максимальным значениями этой величины для данного региона в течение месяца. По данным *MODIS Aqua* были вычислены средние значения ρ для каждого дня августа 2017 г. по внутренности контура, охватывающего устье реки Хатанги (в сентябре данные для этого региона отсутствовали из-за сплошной облачности). Среднее значение оказалось равным 0,044, максимальное – 0,069, минимальное – 0,017. Из данных, показанных на рис. 7, следует,

что при использовании короткой базы $L=0,1$ м, при минимальном значении ρ относительная ошибка определения показателя ослабления составляет 4 % для $c = 80 \text{ м}^{-1}$ и 2 % для $c = 20 \text{ м}^{-1}$.

6. Заключение

1. Величина индикатрисы рассеяния весьма существенно влияет на погрешность определения показателя ослабления (чем более вытянута индикатриса, тем эта погрешность больше). Отметим, что речь идёт о рассеянии на углы порядка 1° . При измерениях в поверхностных слоях для оценки индикатрисы рассеяния можно использовать величину коэффициента яркости на длине волны 530 нм

ρ (530). При этом ошибка определения c мала в тех случаях, когда вклад крупной взвеси в рассеяние на малые углы незначителен (значения $\rho(530)$ достаточно велики). При преобладании в малоугловом рассеянии крупной взвеси рассматриваемая ошибка заметно возрастает (значения $\rho(530)$ достаточно малы). При измерениях показателя ослабления в глубинных слоях (в частности, в придонном нефеллоидном слое) данные об индикатрисе, естественно, отсутствуют, и для оценки погрешности показателя ослабления следует использовать данные, приведённые в [10].

2. Длина базы прибора существенно влияет на ошибку определения c при больших оптических толщинах $\tau = c \cdot L$ (до нескольких десятков процентов). Поэтому для измерений показателя ослабления в мутных водах следует использовать малую базу, для которой ошибки определения c , вызванные многократным рассеянием на длине базы, существенно снижаются.

3. Выполненные расчёты показывают, что угол зрения приёмника существенно влияет на погрешность определения c . Поэтому для измерений следует использовать приборы с расходимостью пучка, существенно меньшей угла зрения приёмника. Кроме того, расчёты показывают, что изменение ширины пучка слабо влияет на результаты (естественно, если радиус пучка меньше радиуса входного отверстия приёмника).

4. Приведённые результаты измерений и выполненные расчёты свидетельствуют о том, что прозрачномер ПУМ с короткой базой может быть рекомендован для измерения показателя ослабления в водах высокой мутности.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема N 0149–2018–0002, руководитель П.О. Завьялов). Авторы признательны О.В. Копелевичу за внимание к работе и ценные замечания. Авторы благодарят М.Д. Кравчишину за предоставленные данные по концентрации взвеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буренков В.И., Купцов В.М., Сивков В.В., Шевченко В.П. Пространственное распределение и дисперсный состав взвеси в море Лаптевых в августе–сентябре 1991 // Океанология.– 1997. – Т. 37, № 6. – С. 920–927.

2. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. Гидрооптика и взвесь арктических морей // Оптика атмосферы и океана.– 2000. – Т. 13, № 1. – С. 71–79.

3. Ramirez-Pérez, M., Rüdiger, R., Torrecilla, E., Píera, J. Cost-Effective Hyperspectral Transmissometers for oceanographic Applications: Performance Analysis // Sensors.– 2015. – Vol. 15. – P. 20967–20989; doi:10.3390/s150920967.

4. Moore, C., Barnard, A., Fietzek, P., Lewis, M.R., Sosik, H.M., White, S., Zielinski, O. Optical tools for ocean monitoring and research // Ocean Sci.– 2009. – Vol. 5. – P. 661–684.

5. Копелевич О.В. Использование видимого излучения при освоении и изучении морей и океанов // Светотехника.– 2017 – № 2. – С. 13–22.

6. Artemiev, V.A., Taskaev, V.R., Burenkov, V.I., Grigoriev, A.V. A multi-purpose compact transmissometer // Proc. of the III Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» – ONW'2005. – St. Petersburg, Russia, 2005.

7. Долин Л.С., Савельев В.А. Новая модель размытия светового пучка в среде с сильно анизотропным рассеянием // Известия АН, физика атмосферы и океана.– 2000. – Т. 36, № 6. – С. 794–801.

8. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. – М: Наука, 1982.– 296 с.

9. Каргин Б.А. Статистическое моделирование поля солнечной радиации в атмосфере – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984.– 206 с.

10. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. – М.: Наука – 1983. – Том 1. – С. 208–234.

11. Petzold, T.J. Volume scattering functions for selected ocean waters. // Scripts Inst. Oceanogr. Report SIO, 1972. – P. 72–78

12. Mobley, C.D. Light and water. Radiative transfer in natural waters. – Academic Press.– 1994.

13. Morel, A., Gentili, B. Diffuse reflectance of oceanic waters. Bidirectional aspects // Appl. Optics.– 1993. – Vol. 32. – P. 6864–6879.

14. Gordon, H.R. Can the Lambert-Beer Law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water // Limnol, Oceanogr.– 1989. – Vol. 35, No. 8. – P. 1389–1409.

15. Levin, I.M. Relation between the seawater optical properties at 550 nm: estimate of its accuracy and extension to case 1 waters // Proc. of the III Int. Conf. «Current

Problems in Optics of Natural Waters» – ONW'2005. – St. Petersburg, Russia, 2005.

16. Копелевич О.В., Гуцин О.А., О статистических и физических моделях светорассеивающих свойств морской воды // Известия АН СССР, физика атмосферы и океана.– 1983. – Т. 14, № 9. – С. 967–973.

17. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектро радиометр и его метрология // Океанология.– 2000. – Т. 40, № 1. – С. 148–155.

18. Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., Patch, J.S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semi-analytical model // Applied Optics.– 1998. – Vol. 37, No. 27. – P. 6329–6338.



Буренков Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук (1975 г.). Окончил МФТИ (1970 г.). Ведущий научный сотрудник ИО РАН



Шеберстов Сергей Валентинович. Окончил механико-математический факультет МГУ (1967 г.). Старший научный сотрудник ИО РАН



Артемьев Владимир Александрович. Окончил радиотехнический факультет Московского авиационного института (1973 г.). Старший научный сотрудник ИО РАН



Таскаев Валерий Романович. Окончил физический факультет МГУ (1980 г.). Ведущий инженер ИО РАН