

Е.Н.Корчемкина, А.А.Латушкин, О.В.Мартынов

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕСИ В МОРСКОЙ ВОДЕ  
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА IN SITU  
ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Рассматривается метод определения содержания взвеси в морской воде на основе данных непосредственных измерений показателя ослабления направленного света. Значения рассеяния взвесью, получаемые дистанционными методами, хорошо соответствуют результатам расчета по данным натурных измерений. Метод дает возможность проводить подспутниковые исследования оптическими методами как более простыми и быстрыми.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *показатель ослабления направленного света, прозрачность, взвесь, полуаналитический алгоритм, MODIS*

В настоящее время при проведении экологического мониторинга широкое распространение получили оптические методы исследования, которые позволяют получать оперативную информацию о состоянии водной среды с высокой точностью. При этом одним из основных широко используемых оптических параметров является показатель ослабления направленного света (ПОС) [1, 2]. Значения ПОС обусловлены наличием в водной среде растворенного, взвешенного и коллоидного вещества (глина, ил, мелкодисперсные органические и неорганические вещества), а также планктона и других микроскопических организмов. Таким образом, показатель ослабления является оптическим проявлением содержания в водной среде рассеивающей и поглощающей свет взвеси и растворенной органики. Связь ПОС с концентрацией общего взвешенного вещества зависит от состава взвешенного вещества и его свойств – размера, формы, показателя преломления частицы, цветового контраста. Все эти свойства определяют региональные особенности акватории. Измерители, предназначенные для измерения показателя ослабления света воды, называются прозрачномерами.

Показатель ослабления направленного света дает возможность объективно оценить концентрацию в водной среде суммарного взвешенного вещества от малых концентраций, характерных для открытых районов Мирового океана (менее 0,2 мг/л) до концентраций более 100 мг/л.

Информативным участком спектра для определения концентрации взвеси с помощью прозрачномеров является красная область [3]. В частности, в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института РАН был разработан и изготовлен малогабаритный спектральный измеритель показателя ослабления направленного света, предназначенный как для проведения исследований вертикальных профилей ПОС *in situ* (зондирующий режим), так для использования в составе проточных систем, при попутных исследованиях с судов либо со стационарных платформ. Подробное описание и технические характеристики разработанного измерителя

представлены в [4]. Особенностью данного прибора является использование в качестве источников света светодиодов, что позволяет проводить одновременные измерения в нескольких участках спектра. В данной модификации прибора используются спектральные каналы 460, 520, 490, и 625 нм. Калибровка прозрачномера осуществлялась с помощью нейтральных светофильтров с известной оптической плотностью. Для расчета концентрации общего взвешенного вещества нами используется длина волны 625 нм [3].

Целью настоящей работы является демонстрация возможности использования прозрачномера для проведения оперативного мониторинга содержания взвешенного вещества в водной среде.

Разработанный измеритель позволяет в режиме реального времени получать информацию о вертикальном распределении измеряемого параметра, с дискретностью получения данных 0,1 м, что, в свою очередь, дает подробное представление об изменчивости вертикальной структуры. Помимо этого, вследствие оперативности получения данных предоставляется возможность выбора информативных горизонтов для последующих отборов проб с целью дальнейших биологических, химических и других анализов.

На протяжении нескольких последних лет гидрооптические измерения прозрачномером проводились во многих экспедиционных исследованиях: в рейсах на судах (НИС «Профессор Водяницкий», НИС «Бирюза», НИС «Денеб»); на океанографической платформе в пгт.Кацивели; в сухопутных экспедициях на озере Сиваш и Азовском море.

В результате получены большие массивы данных спектрального показателя ослабления направленного света для различных акваторий Азово-Черноморского бассейна.

На основе массива данных измерений спектрального показателя ослабления направленного света ( $\text{в м}^{-1}$ ) и концентрации общего взвешенного вещества ( $\text{в мг/л}$ ) (определялась независимым методом) для открытых и прибрежных акваторий были получены регрессионные уравнения, их связывающие [3]. Для открытых участков моря, которые менее подвержены антропогенной нагрузке, эмпирическое соотношение между концентрацией взвеси ( $C_{\text{взв}}$ ,  $\text{мг/л}$ ) и ПОС на 625 нм имеет вид:

$$C_{\text{взв}} = 2,4081\varepsilon_{625} - 0,73. \quad (1)$$

Соотношение (1) дает возможность рассчитывать концентрацию взвеси в процессе измерений. В качестве примера на рис.1 представлены данные по пространственному распределению взвешенного вещества в поверхностном слое, полученные в 87 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 30 июня по 20 июля 2016 г. Расположение станций показано точками. Нужно отметить, что значения на рис.1 отражают моментальные значения концентрации взвеси в каждой точке, а не осредненные по времени.

Результаты измерений для отдельной станции (вертикальное распределение концентрации взвеси и спектры показателя ослабления) приведены на рис.2.

Указанный период исследований отличался повышенными значениями ПОС, что связано с периодом активного цветения микроводорослей. В вертикальном распределении наблюдался характерный сезонный максимум,

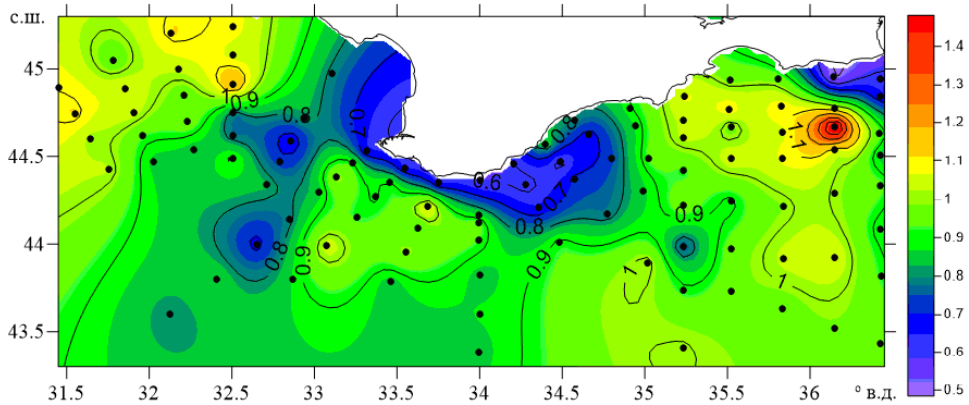


Рис. 1. Распределение концентрации общего взвешенного вещества  $C_{\text{взв}}$  (мг/л) в поверхностном слое по данным прозрачномера (87 рейс НИС «Профессор Водяницкий», 30 июня – 20 июля 2016 г. Расположение станций показано точками).

обусловленный более высокой концентрацией фитопланктона на этом горизонте. В летний период сезонный термоклин и постоянный галоклин совпадают по глубине, создавая единый пикноклин, в котором и образуется максимум ПОС (рис.2, а). Среднее значение глубины максимума ПОС согласно полученным данным составило 12,5 м.

Сравним пространственное распределение взвешенного вещества, полученное посредством измерителя ПОС, с результатами обработки данных сканера *MODIS-Aqua*. Обработка данных производилась при помощи разработанного ранее авторами полуаналитического регионального алгоритма. Алгоритм адаптирован под биооптические условия черноморских вод и позволяет рассчитывать концентрации пигментов фитопланктона, поглощение неживой органикой и рассеяние минеральной взвесью [3]. Алгоритм позволяет выделить влияние поглощения неживой органикой и рассеяния взвесью путем разделения всего диапазона измерений на участки с доминирующим вкладом органики и взвеси, в которых влияние остальных компонентов можно считать спектрально неселективным. Как ранее было показано, алгоритм позволяет достаточно точно оценивать содержание минеральной взвеси в морской воде [4].

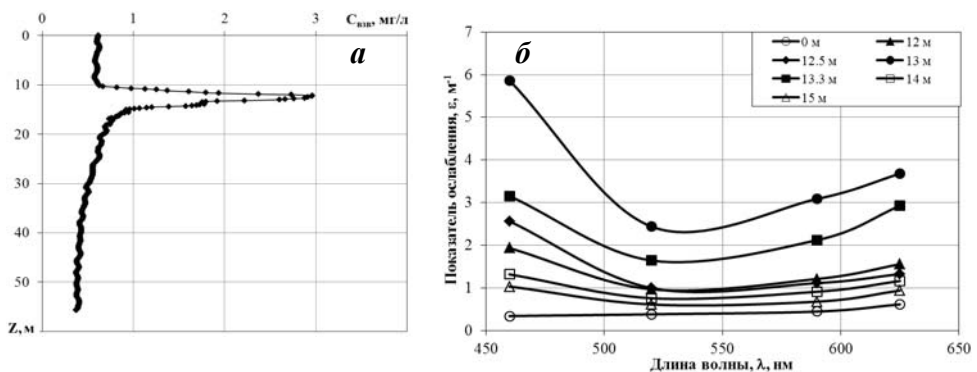


Рис. 2. Профиль концентрации взвеси (а) и спектры ПОС (б).

При обработке спутниковых данных предварительно были скорректированы возможные ошибки стандартной атмосферной коррекции при помощи разработанного авторами метода [5]. В нем для коррекции значения  $R_{rs}$  в коротковолновых каналах используется упрощенная двухпараметрическая модель коэффициента яркости моря, позволяющая по измерениям в зеленой части спектра оценить значение в канале 412 нм.

После проведения коррекции коэффициент яркости аппроксимируется выражением:

$$\rho = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^v}{a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda - \lambda_0)}},$$

где  $k = 0,15$ ;  $b_{bw}(\lambda)$  – показатель обратного рассеяния чистой воды;  $a_w(\lambda)$  – показатель поглощения чистой воды;  $a_{chl}^*(\lambda)$  – спектр удельного поглощения пигментов фитопланктона. Параметры модели:  $b_{bp}(\lambda_0)$  – показатель обратного рассеяния частиц взвеси на длине волны  $\lambda_0 = 400$  нм, концентрация пигментов фитопланктона  $C_{chl}$  и поглощение неживой органикой  $C_{ddm}$  рассчитываются методом оптимизации, каждый в своем спектральном участке. Используются участки спектра 390 – 410 нм для поглощения неживой органикой, 420 – 460 нм для концентрации хлорофилла и 460 – 650 нм для рассеяния взвесью. Итерационная процедура для вычисления  $C_{ddm}$ ,  $C_{chl}$ ,  $b_{bp}$  позволяет стабилизировать решение и упростить расчеты.

Распределение обратного рассеяния  $b_{bp}$  приведено на карте (рис.3). Цветные врезки представляют собой результаты, полученные при обработке одного снимка *MODIS-Aqua*, полученного в конкретный день, обозначенный в верхней части карты. Осредненное распределение, представленное черными контурами, построено по данным 10 снимков, включающих полностью или частично район исследований, полученных в период с 3 по 17 июля.

Проведенное сопоставление показывает определенное соответствие между пространственными распределениями содержания взвеси, вычисленной по

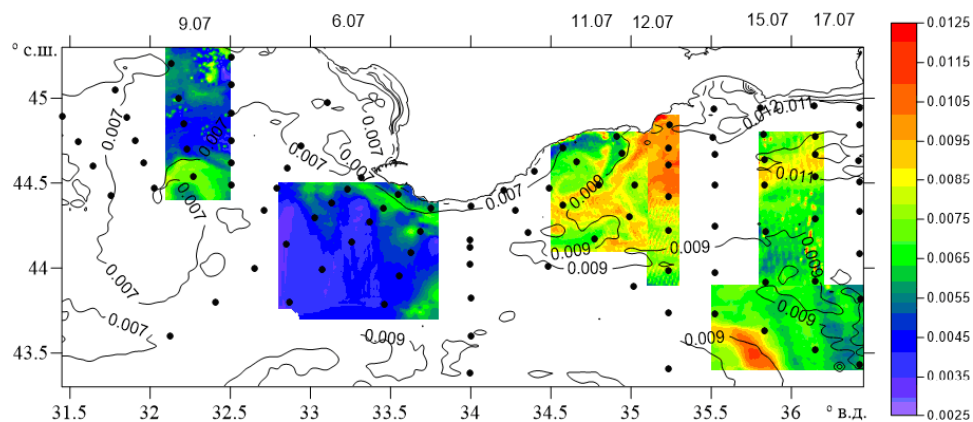


Рис. 3. Распределение обратного рассеяния взвесью  $b_{bp}$  ( $m^{-1}$ ). Контурсы показывают осредненное распределение (3 – 17 июля), цветные врезки представляют моментальные распределения в конкретный день, указанный вверху карты.

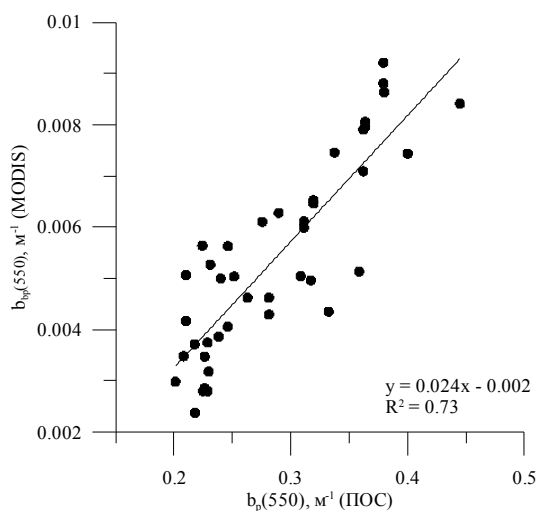


Рис. 4. Сопоставление рассеяния взвесью, рассчитанного по ПОС, и обратного рассеяния по спутниковым данным.

рассчитанного рассеяния и обратного рассеяния, полученного по спутниковым данным, показано также на рис.4, где выбраны совпадающие по координате (с точностью до  $0,005^\circ$ ) и по времени (с разницей до 3 ч) спутниковые и контактные измерения. Разброс полученных точек может объясняться не только погрешностью самих данных, но и различиями в размерной структуре взвеси в разных районах моря. Однако в целом наблюдающаяся линейная зависимость дает возможность использовать прозрачномер в качестве подспутникового инструмента для валидации алгоритмов обработки спутниковых данных и верификации самих данных.

**Выводы.** Разработанный в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института РАН спектральный измеритель показателя ослабления света позволяет оперативно определять состав и биопродуктивность вод, выявлять источники поступления загрязняющих веществ и пути их распространения. Получаемые данные могут быть использованы при мониторинге экологического состояния водной среды и верификации данных спутниковых сканеров. Метод дает возможность проводить подспутниковые исследования оптическими методами как более простыми и быстрыми. Тем не менее, для успешной работы метода необходим сбор натуральных данных о содержании взвеси для регулярной проверки соотношения (1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (RFMEFI57714X0110) и РФФИ (№ 14-45-01049 «Разработка регионального алгоритма определения биооптических характеристик прибрежных вод Черного моря по данным дистанционного зондирования», № 14-45-01610 «Новый подход к определению биооптических свойств вод по измерениям спектральных характеристик флуоресценции и рассеяния света в морской среде»).

спутниковым и контактными данным. В обоих распределениях наблюдаются более низкие значения концентрации взвеси вдоль береговой черты Гераклейского п-ова и ее повышенное содержание в восточной части исследованной акватории. Вместе с тем спутниковая карта показывает вполне логичное смещение основных пятен взвеси в западном направлении по сравнению с распределенной во времени картой на рис.1.

Данные ПОС позволяют рассчитать не только концентрацию взвеси, но и рассеяние. Качественное соответствие пространственной структуры рас-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bricaud A., Roesler C., Zaneveld J.R.V.* In situ methods for measuring the inherent optical properties of ocean waters // *Limnol. Oceanogr.*– 1995.– 40-2.– P.393-410.
2. *Левин И.М., Родионов М.А., Французов О.Н.* Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой // *Оптический журнал.*– 2011.– 78-5.– С.59-63.
3. *Маньковский В.И., Соловьев М.В.* Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.*– 2003.– 2.– С.60-65.
4. *Латушкин А.А.* Многоканальный измеритель коэффициента ослабления света для проведения океанографических подспутниковых исследований / Управление и мехатронные системы. Севастополь, 16-19 апреля 2013 г.– Севастополь: Изд. СевНТУ, 2013.– С.231-236.
5. *Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчемкина Е.Н., Мартынов О.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофизический журнал.*– 2015.– 6.– С.17-33.
6. *Корчемкина Е.Н., Ли М.Е.* Аномальные оптические характеристики прибрежных вод Черного моря в июле 2012 года и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.*– 2015.– 8-4.– С.39-43.
7. *Корчемкина Е.Н., Шибанов Е.Е., Ли М.Е.* Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // *Исследование Земли из космоса.*– 2009.– 6.– С.24-30.

Материал поступил в редакцию 01.12.2016 г.  
После доработки 20.04.2017 г.

E.N.Korchemkina, A.A.Latushkin, O.V.Martynov

#### METHOD OF DETERMINATION OF SUSPENDED MATTER CONTENT IN SEAWATER FROM IN SITU BEAM ATTENUATION MEASUREMENTS FOR REMOTE SENSING DATA VERIFICATION

The method for determining the concentration of suspended matter in seawater based on direct measurements of the beam attenuation coefficient is discussed. Suspended matter concentrations obtained by remote method are in good agreement with the results of calculation from the in situ data. The method allows to use simpler and faster optical instruments for subsatellite experiments.

KEYWORDS: beam attenuation coefficient, transparency, total suspended matter, mineral particles, semi-analytical algorithm, MODIS.