

## РАЗРАБОТКИ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В МГИ НАН УКРАИНЫ

М.Е. Ли

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: lee@alpha.mhi.iuf.net

*В статье приводятся методы и приборы, разработанные в МГИ НАН Украины для подспутникового обеспечения космических сканеров цвета моря контрольными биооптическими данными. Комплекс аппаратуры подспутникового обеспечения, включает в себя приборы для измерений характеристик светового поля, коэффициента яркости моря, спектрального показателя ослабления и индикатрисы рассеяния света. Полученная с помощью этой аппаратуры подспутниковая информация успешно использовалась для анализа и интерпретации цветных съемок поверхностных вод сканером SeaWiFS.*

**Введение** Реализация новой концепции подспутникового обеспечения космических сканеров цвета нового поколения потребовала пересмотра основных принципов и направлений, по которым создавалась аппаратура для гидрооптических исследований. Особенно тщательно исследовались возможности минимизации помех от взволнованной поверхности моря в зависимости от погодных условий и геометрии освещения. Связано это с тем, что высокую точность современных спектрофотометров для измерений световых потоков в море часто оказывалось невозможно реализовать из-за несоизмеримо больших методических погрешностей. С целью уменьшения методических погрешностей методы традиционных световых измерений в море были пересмотрены и приведены к такому виду, чтобы можно было осуществить переход от абсолютных измерений световых потоков к их сравнению в дифференциальном фотометре. При этом был реализован комплексный подход с использованием новейших достижений в области создания подводных датчиков световых измерений, сбора и обработки информации на основе применения специализированных микропроцессоров и компьютеров и разработки программного обеспечения.

Большой опыт по унификации методов и приборов для гидрооптических измерений накопленный в отделе оптики и биофизики МГИ НАН Украины, позволил ему разработать соответствующие новым задачам унифицированные оптоэлектронные блоки и устройства и реализовывать на их основе гидрооптические приборы самого различного назначения. По этому принципу был создан комплекс гидрооптических приборов, который успешно применялся во многих экспедициях на научно-исследовательских судах, океанографической платформе и самолете-лаборатории АН-30. В последние годы приборы комплекса были существенно модернизированы и переработаны с таким расчетом, чтобы их характеристики соответствовали рекомендациям рабочей группы SeaWiFS, а набор измеряемых параметров был бы достаточным для применения в океанологических подспутниковых экспериментах биооптического направления (рис. 1).



Р и с. 1. Схема биооптического подспутникового эксперимента

В варианте подспутникового обеспечения, комплекс аппаратуры включает в себя приборы для измерений характеристик светового поля, коэффициента яркости моря и индекса цвета. Помимо этого в состав комплекса включены приборы для измерений таких первичных гидрооптических характеристик, как спектральный показатель ослабления света и полярный нефелометр, способный измерять индикатрису рассеяния в

очень широком диапазоне углов рассеяния – от долей градуса в направлении облучающего луча до углов вблизи  $180^\circ$  в обратном направлении.

**Дифференциальные методы измерений интегральных характеристик подводного светового поля.** Традиционным и общепринятым методом определения таких интегральных параметров светового поля, как показатели вертикального ослабления  $K_d(z, \lambda)$ ,  $K_u(z, \lambda)$  и  $K_L(z, \lambda)$  является вычисление их по данным измерений глубинного относительного хода облученностей  $E_d(z, \lambda)$ ,  $E_u(z, \lambda)$  и яркости восходящего излучения  $L_u(z, \lambda)$  по хорошо известным формулам

$$E_d(z, \lambda) = E_d(0, \lambda) e^{-\int_0^z K_d(z', \lambda) dz'} \quad (1)$$

$$E_u(z, \lambda) = E_u(0, \lambda) e^{-\int_0^z K_u(z', \lambda) dz'} \quad (2)$$

$$L_u(z, \lambda) = L_u(0, \lambda) e^{-\int_0^z K_L(z', \lambda) dz'} \quad (3)$$

Прологарифмировав выражения (1), (2) и (3) получим

$$-\int_0^z K(z) dz = \ln E(z) - \ln E(0^-), \quad (4)$$

так что:

$$K(z) = -\frac{d \ln E(z)}{dz}. \quad (5)$$

Таким образом, оценка показателя вертикального ослабления облученности этим методом производится, по данным измерений подводного спектрофотометра, путем определения локальных наклонов кривой  $\ln E(z)$  в интервале глубин в 5 – 10 м. Основным недостатком метода является сильная зависимость исходных величин облученностей от условий освещения и состояния поверхности моря. Несмотря на то, что во время измерений производится постоянный контроль за величиной падающего излучения по палубному датчику, а флуктуации облученностей от волнения усредняются, полностью скомпенсировать методические помехи не удастся. Значительного уменьшения методических погрешностей от этих факторов можно добиться применением дифференциального метода измерений. Суть метода состоит в том, что измерению подвергается разность логарифмов облученностей от двух косинусных коллекторов, разнесенных друг от друга на не-

сколько метров по глубине. В этом случае, измеряется непосредственно показатель вертикального ослабления облученности, а надобность в измерении абсолютных значений облученностей отпадает. Поэтому измеряемые величины показателей вертикального ослабления света становятся практически независимыми от условий внешнего освещения, а флуктуации облученностей из-за поверхностного волнения значительно меньше сказываются на результатах измерений, причем, только лишь на небольших глубинах. Объясняется это особенностями распределения по глубине статистических характеристик флуктуаций подводной облученности.

Данные исследований, выполненных на шельфе Черного моря, в Атлантическом и Тихом океанах, а также и в других водоемах показали, что флуктуации светового поля под водой вызываются главным образом волнением моря [1, 2]. Одними из факторов являются эффекты фокусировки лучей, при прохождении света через взволнованную поверхность, а другие определяются пульсациями геометрического пути светового пучка за счет колебаний уровня морской поверхности. Пульсации геометрического пути лучей вызывают флуктуации характеристик светового поля во всей толще фотического слоя моря, тогда как линзовые эффекты, напротив, сказываются лишь у самой поверхности. Поэтому у поверхности моря наблюдается наибольшая анизотропия подводного светового поля, вызываемая концентрацией флуктуаций на глубине фокусировки лучей, определяемой кривизной поверхности волны.

Для реальной волны, состоящей из совокупности множества поверхностей с различной кривизной, возможно существование нескольких глубин фокусировки лучей. Для реальной взволнованной поверхности с непрерывным спектром глубина фокусировки нормально падающих лучей на волнах длиной  $\lambda$  определяется формулой:

$$z = \frac{n}{n-1} \frac{\sqrt{2}}{2\pi\sigma} \lambda, \quad (6)$$

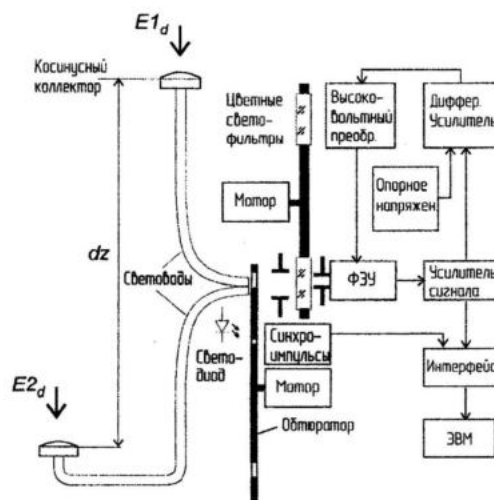
где  $n$  – показатель преломления;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение градиента поверхности. Для реальной волны,

состоящей из совокупности множества поверхностей с различной кривизной, возможно существование нескольких глубин фокусировки лучей. Вследствие этого вблизи волнующейся поверхности моря флуктуации облученности становятся как весьма значительными по интенсивности, так и слабокоррелированными даже на близлежащих горизонтах. Расчеты, проведенные по данным натуральных измерений флуктуаций облученности, показали, что поверхностный слой, в котором, в основном, локализуются сфокусированные лучи, простирается от глубин в нескольких метрах до десятка метров. На кривых спектральной плотности энергии флуктуаций облученности эти процессы проявляются в виде двух максимумов, один из которых соответствует главному максимуму спектральной плотности волнения, а второй, более высокочастотный, обязан своим происхождением линзовым эффектам. С глубиной прослеживается сдвиг второго максимума в сторону низких частот и слияние его с первым максимумом на глубине, где эффекты фокусировки уже не сказываются на флуктуациях облученности. Исследования флуктуаций облученности в условиях открытого океана выявили в целом сходные закономерности поведения флуктуаций облученности с глубиной. Для рассматриваемого случая наиболее важным является то, что во всей толще моря, за исключением самого приповерхностного слоя, спектр флуктуаций облученности и спектр колебаний возвышений практически совпадают, а степень когерентности на низких частотах между ними приближается к единице.

Основываясь на этом, некоторыми исследователями была предпринята попытка уменьшить влияние флуктуаций на результаты измерений с помощью двух идентичных фотометров, разнесенных по глубине на известное расстояние. Но, поскольку в этом случае, суть абсолютных измерений практически не меняется, то и существенного выигрыша в уменьшении методических погрешностей получить не удастся. Сами датчики, каждый в отдельности, представляют собой совершенно самостоятельные отдельные одноканальные фотометры прямого отсчета, поэтому различия в их характеристиках

приводят к низкой чувствительности по отношению к изменениям оптических свойств вод. Вследствие этого в чистых водах датчики приходится разносить на очень большое расстояние, достигающее десяти и более метров, что нежелательно как с точки зрения компенсации методических погрешностей, так и из соображений удобства конструктивного оформления.

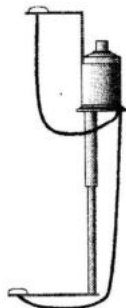
Нами предложен новый дифференциальный метод непосредственного измерения интегральных характеристик ослабления светового поля под водой, позволяющий практически полностью избавиться от влияния условий внешнего облучения и существенно уменьшить погрешности измерений от флуктуаций облученности [3]. Главной отличительной особенностью созданного дифференциального фотометра является то, что два его светоприемных устройства с помощью световодов выведены за пределы герметичного контейнера прибора и могут разноситься на расстояние до нескольких метров. На рис. 2 представлена функциональная схема дифференциального подводного фотометра.



Р и с. 2. Функциональная схема спектрофотометра для измерений параметров светового поля

С помощью этого светоприемного устройства по принципу двухлучевого дифференциального фотометра, удастся измерять сразу несколько параметров подводного светового поля: показатель вертикального ослабления облученности сверху  $K_d(z, \lambda)$ , снизу  $K_u(z, \lambda)$  и коэффициент диффузного отражения  $R(z, \lambda)$ .

Светопринимающие устройства выполнены в виде "косинусных" коллекторов, закрепленных на концах гибких длинных световодов. Другие концы световодов сведены вместе в специальную обойму и герметично заделаны в крышку контейнера (рис. 3).



Р и с. 3. Спектрофотометр для измерений параметров светового поля

Преимуществом описанного способа определения интегральных параметров светового поля является то, что, таким образом, удастся преодолеть многие трудности абсолютных измерений подводной облученности и, связанных с этим, проблем абсолютных калибровок. Дифференциальный метод позволяет гораздо проще достичь тех высоких точностей измерений, которые требуются для подспутникового обеспечения. При таком подходе значительно уменьшаются также и методические погрешности натуральных измерений, связанные с флуктуациями подводной облученности из-за поверхностного волнения.

Развернув "косинусные" коллекторы в надир можно определить показатель диффузного ослабления облученности снизу. Наконец, сдвинув "косинусные" коллекторы вместе и направив их в противоположные по вертикали стороны, можно определить коэффициент диффузного отражения.

При необходимости, калибровка таких фотометров может производиться даже в экспедиционных условиях, поскольку для этого не требуется наличия уникальных эталонов и сложного метрологического оборудования. Вполне достаточно калибровки по образцовым нейтральным стеклам с известной оптической плотностью, стабильность характеристик которых гарантируются в течение длительного времени.

**Использование коэффициента яркости моря в качестве основного параметра при подспутниковых измерениях.** Спектрофотометры для измерений спектральных особенностей коэффициента яркости моря являются одними из основных гидрооптических приборов при проведении океанологических подспутниковых экспериментов для опорной калибровки космических сканеров цвета нового поколения. Поэтому появляется все больше работ, посвященных методике измерения коэффициента яркости, приборам для этих измерений и определению биооптических параметров вод по результатам измерений коэффициента яркости. В экспедиционных условиях коэффициент яркости можно определять различными способами. Одним из широко распространенных на первоначальном этапе исследований был способ определения с помощью измерителя яркости. При этом процесс измерений проходил в два этапа: сначала производилось измерение яркости горизонтально расположенного эталонного диффузно рассеивающего экрана, затем измеряли яркость водной толщи. В случае дистанционных измерений проводили также измерения яркости неба.

В ряде исследований определение коэффициента яркости производилось по результатам одновременных измерений двух датчиков: измерителя падающей облученности и измерителя яркости, причем измерения восходящей яркости проводились как дистанционно, так и непосредственно в воде. Однако такие способы измерений предъявляют очень высокие требования к точности, долговременной стабильности и линейности характеристик датчиков. В случае измерений проведенных одним прибором измерения разделены по времени, и это обстоятельство накладывает дополнительные ограничения на стабильность внешних погодных условий. При определении двумя разными датчиками небольшие погрешности каждого из измерителей могут привести к недопустимым результирующим ошибкам. Кроме того, для таких измерений нужна абсолютная калибровка фотометров для измерений облученности и яркости с высокой точностью, что, в настоящее время, трудно

осуществить в экспедиционных условиях.

Чтобы преодолеть вышеперечисленные трудности в ряде стран были разработаны специальные широкодиапазонные высокостабильные фотометры для определения коэффициента яркости моря, в которых измерения облученности сверху, восходящей яркости, яркости неба производятся практически одновременно одним датчиком, но по разным оптическим каналам. Применение этих приборов повысило качество измерений, но проблемы абсолютной калибровки решены не были, поскольку каждый оптический канал требовал отдельной калибровки.

Один из наиболее совершенных приборов разработан в отделе оптики моря МГИ НАН Украины. Он представляет собой универсальный спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря, позволяющий решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления (рис. 4).



Р и с. 4. Спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря

В нем предусмотрена возможность одновременного измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения моря или яркости небосвода, нормированных на излучение падающей на поверхность моря спектральной облученности [4]. Предусмотрена также возможность работы как с борта исследовательского судна на ходу во время переходов, так и непосредственно с поверхности моря, на гидрологических станциях. Для этого прибор снабжен дополнительными поплавками и подводным парусом, которые позволяют ему плавать по поверхности моря и отводиться на достаточно большое расстояние от судна. Различные варианты использования этого спектрофотометра с

борта научно-исследовательского судна представлены на рис. 1.

Дистанционные измерения с борта научного судна позволяют обеспечить большую информативность, поскольку работы могут производиться на ходу, но требуемая для подспутниковых целей точность измерений может быть достигнута только в ясную погоду, когда волнение моря не превышает 2-3 баллов, а условия освещения достаточно стабильны. При большем волнении, особенно при наличии мелкой ряби, помехи от солнечных бликов и из-за отражений от взволнованной поверхности моря различных участков небосвода, становятся настолько большими, что их не удается пока полностью устранить простой отбраковкой выбросов и специальными процедурами сглаживания.

Кроме этого, при измерениях с борта судна важно учитывать влияние на точность измерений степени затенения корпусом судна столба воды, формирующего восходящую яркость. Поэтому измерения с борта судна целесообразно проводить лишь в очень ясную погоду или в случаях, когда необходимо быстро получить информацию о пространственном распределении коэффициента яркости моря на обширной акватории.

В случае измерений с борта судна, коэффициент яркости моря выражается через измеряемые световые потоки формулой:

$$R_L = \frac{n^2}{T_1 T_2} \cdot \frac{L_u - r_f L_{sk}}{E_s} \quad (7)$$

где  $n$  – показатель преломления света водой;  $r_f = 0,02$  – френелевский коэффициент отражения при нормальном падении;  $T_1$  – коэффициент пропускания границей раздела воздух-вода;  $T_2$  – коэффициент пропускания границей раздела вода-воздух, диффузно отраженного толщей моря в зенит.

Измерения, выполняемые в плавающем варианте, позволяют до минимума уменьшить перечисленные методические погрешности и получать контрольно-калибровочные данные с требуемой для решения биоптических задач точностью. Поэтому в работах по сбору высококачественных опорных подспутниковых данных по космическим проектам ПРИРОДА,

SeaWiFS и других, измерения коэффициента яркости моря желательнее производить на гидрологических станциях, прибором, плавающим по поверхности моря вне зоны затенения судна. Несмотря на то, что процедура измерений несколько усложняется, такой метод позволяет работать даже в тех погодных условиях, какие совершенно не приемлемы для бортового варианта и, при этом, почти полностью избежать методических погрешностей от помех, связанных с взволнованной поверхностью и затенением корпусом судна.

**Подспутниковое обеспечение данными о первичных оптических характеристиках морских вод.** В отличие от параметров светового поля, первичные оптические характеристики являются неизменными свойствами рассеивающей среды, независимыми, ни от условий освещения, ни от трансформации излучения в процессе его распространения в воде. Существенным является то, что они позволяют весьма подробно исследовать вертикальную оптическую структуру вод, а по особенностям вертикального профиля даже оценивать природу светорассеивающих слоев в море. Их знание существенно улучшает качество физической интерпретации данных подспутниковых измерений и позволяет совершенствовать методы решения обратных задач в оптике моря. Естественно, более полный набор первичных оптических характеристик позволяет разрабатывать более совершенные, физически обоснованные, аналитические модели восходящего излучения и биооптические алгоритмы. Например, это относится к проблеме моделирования спектров восходящего излучения в ближней ИК-области спектра, где непосредственные измерения  $L_u$  затруднены, из-за чрезвычайно малой глубины проникновения ИК-излучения, составляющей всего лишь несколько сантиметров.

Из первичных гидрооптических характеристик наиболее существенными для целей подспутникового обеспечения являются спектральный показатель поглощения  $\alpha(z, \lambda)$  и индикатриса рассеяния  $\beta(z, \lambda, \theta)$ , а также производные от них характеристики, такие как показатель ослабления луча на длине волны  $b_{660}$  *нм*

$c(z, 660)$ , спектральные показатели ослабления  $c(z, \lambda)$  и рассеяния назад  $b_b(z, \lambda)$ .

Разработке методов измерений спектрального показателя поглощения  $\alpha(z, \lambda)$  в разное время было посвящено много работ, но до сих пор решить эту проблему с достаточной для практических нужд точностью пока не удается. Большинство, из существующих в настоящее время методов, являются косвенными. Они основаны на измерении различных характеристик при прохождении светового излучения сквозь водную среду. Долгое время спектральные характеристики поглощения света лишь приблизительно оценивались по характеристикам подводного светового поля, а также по характеристикам отраженного от входящего в воду лазерного или солнечного излучения [5, 6].

Неоднократно делались также попытки разработки и прямых методов измерений спектрального показателя поглощения  $\alpha(z, \lambda)$  морских вод. Наиболее распространенным является метод измерений с применением зеркальной отражающей трубы, внутри которой размещается исследуемая среда. В последние годы, построенные по этому принципу приборы, стали находить практическое применение при гидрооптических исследованиях, но только лишь для приблизительных оценок спектрального поглощения морских вод [7].

На практике, трудно обеспечить одновременные измерения всех перечисленных первичных оптических свойств морской воды, поэтому, желательнее, подразделить их по уровням приоритетности, в соответствии с характером решаемых задач и возможностями имеющихся приборов. В МГИ НАНУ наиболее развиты методы и аппаратура для измерений показателя ослабления направленного излучения, которые в течение многих лет использовались нами при проведении гидрооптических исследований во многих морях и океанах. Выбор этой первичной оптической характеристики, в качестве одного из дополнительных параметров, необходимых при проведении подспутниковых гидрооптических измерений не случаен. По определению, показатель ослабления направленного света представляет собой сумму

показателей поглощения и рассеяния и, следовательно, содержит в себе информацию об особенностях проявления этих процессов в различных водах. Наиболее важные, изученные к настоящему времени, особенности заключаются в следующем:

– в спектре показателя ослабления, полосы поглощения света взвешенных частиц становятся едва различимыми, из-за компенсирующего изменения интенсивности рассеяния;

– спектральная кривая поглощения растворенным веществом воспроизводится в спектре показателя ослабления, практически, без изменений и описывается степенной функцией;

– в красной области спектра поглощение света, как частицами, так и растворенным органическим веществом становится чрезвычайно малым.

Основываясь на этих выводах, автором была предложена методика восстановления примесей в морской воде. Практическая реализация методики потребовала создания новых и усовершенствования имеющихся приборов для измерений показателя ослабления направленного света. При проведении подспутниковых экспериментов, эти приборы позволяют не только измерять вертикальные профили ослабления и рассеяния света, но и существенно дополняют традиционные биооптические определения подробными данными об их стратификации, а также дадут возможность отбирать пробы на оптимальном числе горизонтов.

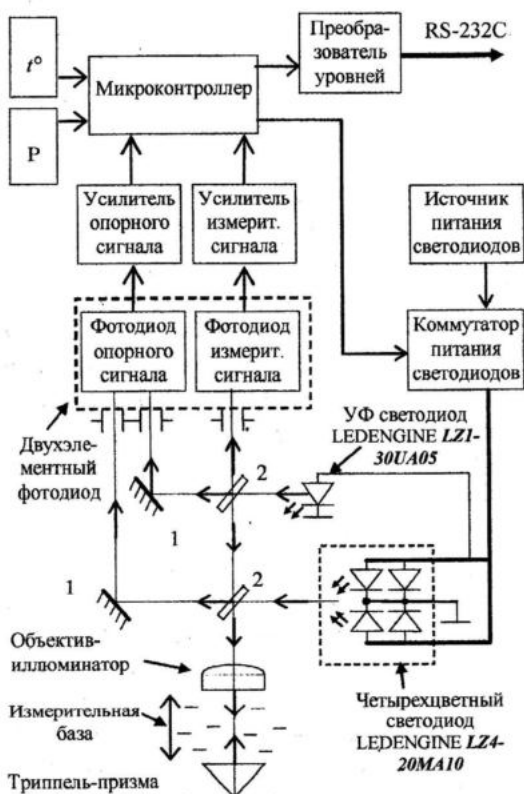
**Методы измерений спектрального показателя ослабления направленного света и общего показателя рассеяния.** В течение многих лет прозрачность поверхностных вод оценивалась по глубине видимости белого стандартного диска. Несмотря на чрезвычайную простоту этих измерений, они имеют ограниченное применение в силу субъективности в оценке результатов, из-за сильной зависимости от остроты зрения и навыков конкретного наблюдателя. Кроме того, оценка прозрачности морской воды по глубине видимости белого диска совершенно не применима в случаях, когда важно знать данные о распределении этой характеристики по глубине. В качестве параметра, более объективно харак-

теризующего меру ослабления света, удобно использовать показатель ослабления направленного излучения (прозрачность) морской воды. Для измерения этого параметра создано множество конструкций прозрачномеров, использующих различные виды оптических и фотоэлектрических схем. Почти все они основаны на применении базисного метода и измеряют ослабление пучка света, проходящего в среде определенное расстояние, задаваемое оптической базой прибора. Точность измерения показателя ослабления излучения по этому методу определяется, в основном, нестабильностью элементов фотоэлектрической схемы и такими геометрическими параметрами, как угол расходимости источника света, угол фотоприемника и длина оптической базы. Погрешность, из-за нестабильности элементов фотоэлектрической схемы, сравнительно легко уменьшается выбором соответствующего способа фотоэлектрической регистрации. Остальные факторы по-разному влияют на точность измерений показателя ослабления излучения в природных водах различной мутности и требуют в каждом конкретном случае подбора оптимальных условий. Расчеты оптимальных углов зрения фотоприемника и расходимости пучка света производятся, исходя из заданной точности и экстремальных индикатрис рассеяния. В этом случае подбор оптимальных условий можно производить только изменением длины оптической базы. В разработанных ранее прозрачномерах оптические схемы не всегда обеспечивали выполнение этих требований, поэтому в них, под воздействием внешних факторов, происходила частичная разъюстировка. Именно этим можно объяснить то, что данные, полученные разными приборами, иногда, различаются между собой. По этой же причине в них не предусматривается возможность изменения оптической базы, поэтому они позволяют производить измерения показателя ослабления светорассеивающих сред лишь в ограниченном диапазоне изменения оптических характеристик.

Следовательно, для целей подспутникового обеспечения, необходимо было разработать принципиально новую схе-

му прозрачного, которая, с одной стороны, обладала бы высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов, а с другой – обеспечивала возможность перемены оптической базы даже в полевых условиях. Автором было найдено оригинальное решение, которое в дальнейшем было усовершенствовано применением автоколлимационной оптической схемы с трипель-призмой в качестве отражающего элемента [8].

Принцип действия прибора для одновременного измерения в девяти спектральных каналах [9, 10] иллюстрирует функциональная схема, приведенная на рис. 5.



Р и с. 5. Измеритель спектрального показателя ослабления света

Ход лучей в такой автоколлимационной схеме при различных ориентациях призмы относительно оси измерительного пучка света не меняется. Поэтому можно плавно изменять длину оптической базы прозрачного простого перемещением или перестановкой призмы вдоль оси пучка, поскольку юстировка прибора при этом не нарушается. Следовательно, появляется возможность практически неограниченно расширять диапа-

зон измерения показателя ослабления излучения, поскольку, даже в сильно отличающихся по своим оптическим свойствам средах, удается производить их в оптимальных условиях с одинаковой относительной погрешностью.

Возможность легко изменять в широких пределах длину оптической базы прозрачного, позволяет решить и такую проблему, как получение абсолютных значений показателя ослабления излучения. Для этого достаточно провести измерения одной и той же среды для двух различных баз, в пределах которых происходит однократное рассеяние. В этом случае, исчезает необходимость введения поправки на изменение коэффициента отражения поверхностей оптических деталей, соприкасающихся с морской водой, при погружении прибора в море. В настоящее время, эта поправка рассчитывается теоретическим путем для каждой конкретной оптической схемы отдельно. Ввиду того, что величина поправки значительно превышает значение показателя ослабления чистой воды, неточность ее определения, зачастую, является основной причиной неоправданно высокой аддитивной составляющей методической погрешности. Это обстоятельство являлось главной причиной, почему до сих пор не удается достичь высокой точности при полевых измерениях показателя ослабления направленного света.

Еще одним преимуществом автоколлимационной схемы прозрачного, с трипельпризмой в качестве отражающего элемента, является то, что она практически не реагирует на незначительные уводы лучей при соприкосновении с измеряемой средой, а также на различные деформации оптических деталей и механических конструкций, составляющих оптическую базу прибора. Благодаря этому, исключается возможность разъюстировки прибора в процессе эксплуатации, что имеет важное значение для измерений в морских условиях, особенно на больших глубинах, где велико давление воды.

Диаметр выходной диафрагмы подбирается из такого расчета, чтобы диаметр параллельного пучка, при выходе из герметичного контейнера, был бы



меньше диаметра объектива-иллюминатора на величину расходимости этого пучка на длине оптической базы прибора. Соблюдение этого условия очень важно для правильной работы прозрачномера, собранного по автоколлимационной оптической схеме, поскольку позволяет избежать виньетирования расширившегося пучка при вхождении его внутрь герметичного контейнера через один и тот же объектив-иллюминатор.

**Новые принципы измерений индикатрисы в широком диапазоне углов рассеяния морских вод.** При проведении комплексных подспутниковых океанографических исследований в видимом диапазоне особенно важно обеспечить качественное измерение этого важнейшего параметра светорассеяния. Чрезвычайно сильно вытянутая индикатриса рассеяния морских вод диктует необходимость применения в нефелометрах узконаправленных источников света большой мощности и высокочувствительных приемников с высоким угловым разрешением и очень широким диапазоном измерений. Поэтому, в случаях, когда необходимо обеспечить измерения полной индикатрисы рассеяния, во всем диапазоне углов рассеяния приходится сталкиваться с множеством взаимоисключающих требований. При разработке приемлемой для практических целей конструкции совместить все эти противоречивые требования в одном приборе чрезвычайно трудно. Объясняется это тем, что измерения рассеяния в малых углах в морской воде требуют такого высокого углового разрешения нефелометра, а, следовательно, и соответствующего увеличения габаритов осветителя и светоприемного устройства, что возможности конструктивных решений оказываются нецелесообразными с точки зрения применения такого прибора в полевых условиях. Именно поэтому эта схема измерений применялась, в основном, в лабораторных нефелометрах, где требования к конструкции и габаритам прибора намного ниже, чем для полевых приборов "in situ", или в громоздких установках, предназначенных для размещения на подводных лодках или аппаратах.

Стремление разрешить эти проблемы для погружаемых приборов привело к

тому, что полярные нефелометры создавались только для больших углов, а для измерений интенсивности рассеяния в малых углах привлекались другие приборы, работа которых основывалась на применении малоугловых методов. Надо отметить, что вопросам совершенствования методов и приборов для измерений индикатрисы рассеяния в море в течение длительного времени уделялось недостаточное внимание. По этой причине в гидрооптике до сих пор используются измерители индикатрис, созданные более двадцати лет назад по схемам, предложенным Петцольдом [11] и другими. Еще несколько разработок этого времени и более поздние отличаются несущественными деталями и являются, по сути, незначительной их модификацией. Несмотря на то, что все перечисленные приборы все еще позволяют получать достаточно качественный материал, они, все же, в значительной мере устарели и не отвечают современным требованиям, предъявляемым к оптической аппаратуре для подспутниковых исследований. Из-за невысокой угловой разрешающей способности они не могут обеспечить измерение полной индикатрисы рассеяния и поэтому вынужденно ограничиваются измерениями на больших углах. Данные рассеяния в малых углах приходится дополнять экстраполяцией по параболе или другому закону или же восстанавливать по одному-трем дискретным значениям рассеяния, измеренным малоугловым методом. К другим недостаткам следует отнести невысокую точность и большое время измерений, а также выдачу ее результатов в виде неудобном для регистрации и хранения в современных системах сбора и обработки информации. Приборы имеют весьма громоздкую конструкцию и, вследствие этого, неудобны для эксплуатации и обслуживания в трудных морских условиях.

Показатель рассеяния в данном направлении  $b(\theta)$ , по определению можно записать в следующем виде:

$$b(\theta) = I(\theta) / E \cdot V(\theta), \quad (8)$$

где  $I(\theta)$  – сила света, рассеянного объемом  $V(\theta)$  в направлении  $\theta$ ,  $E$  – освещенность рассеивающего объема падающим

пучком света. Поскольку современные фотоприемники измеряют, как правило, потоки излучений, то формулу (8) удобнее выразить через потоки падающего и рассеянного излучений. Величина рассеянного потока  $F(\theta)$  может быть выражена через параметры оптических систем измерителя рассеяния следующей зависимостью:

$$F(\theta) = I(\theta)\Omega e^{-cr}, \quad (9)$$

где  $\Omega$  – телесный угол поля зрения приемника света;  $c$  – показатель ослабления направленного света;  $r$  – расстояние от центра рассеивающего объема до приемника. Освещенность  $E$  создается входящим в воду потоком пучка света  $F_0$ , ослабленным на пути  $r_1$  от источника до центра рассеивающего объема:

$$E = F_0 \cdot e^{-cr_1} / S, \quad (10)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения падающего пучка света. Таким образом, из (8) – (10) получаем:

$$b(\theta) = F(\theta) S e^{-c(r_1 + r_2)} / F_0 \Omega V(\theta). \quad (11)$$

Для определения абсолютных значений показателя рассеяния в данном направлении по этой формуле, возникает необходимость проведения дополнительных измерений величин  $F_0$  и  $c$ , что не всегда удается сделать. Поэтому обычно ограничиваются определением относительного углового распределения рассеяния света. Если полярный нефелометр имеет возможность измерять дополнительно и ослабление прямого пучка тем же приемником при  $\theta = 0$ , то его калибровку по абсолютным значениям  $b(\theta)$  удобнее всего проводить методом Кулленберга [12]. В этом случае, в соответствии с законом Бугера, падающий на фотоприемник свет будет определяться:

$$F(0) = F_0 e^{-c(r_1 + r_2)}. \quad (12)$$

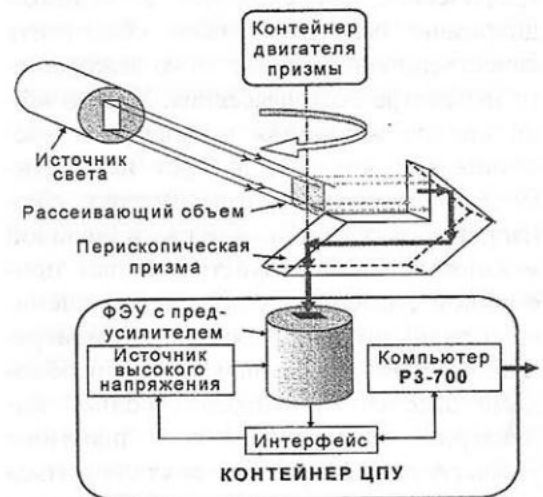
Отсюда, из (11) и (12) следует, что:

$$b(\theta) = F(\theta) S / F(0) \Omega V(\theta). \quad (13)$$

Как видим, одновременные измерения потоков рассеянного и прямого ослабленного излучения позволяют легко определять абсолютные значения  $b(\theta)$ , поскольку остальные, входящие в формулу

(13) величины известны из параметров оптической системы.

В связи с подготовкой к проведению подспутниковых экспериментов по международным проектам дистанционного зондирования Земли из космоса ПРИРОДА и SeaWiFS, автором был разработан полярный нефелометр, в котором большинство из перечисленных выше недостатков существующих приборов удалось устранить [13, 14]. Это оказалось возможным благодаря использованию, представленной на рис. 6 новой схемы измерений индикатрисы рассеяния.



Р и с. 6. Спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря

Отличительной особенностью нового принципа измерений является то, что развертка по углу осуществляется по принципу работы перископа, путем вращения специальной стеклянной призмы, вокруг оси светоприемного устройства, перпендикулярной плоскости сканирования и проходящей через центр рассеивающего объема. Вследствие этого осветитель и светоприемное устройство нефелометра остаются неподвижными в процессе измерений. Оригинальная перископическая форма призмы и строго подобранные ее размеры позволяют светоприемному устройству регистрировать рассеянное излучение практически во всем диапазоне углов, включая и случай измерения ослабления прямого пучка.

Поскольку осветитель и светоприемное устройство нефелометра жестко закреплены и неподвижны, то увеличение их габаритов (длины) не приводит к су-

щественному усложнению конструкции. При этом само устройство сканирования значительно упрощается и становится очень компактным. Следовательно, открывается возможность добиться высокого углового разрешения нефелометра и, за счет этого, обеспечить измерение полной индикатрисы одним прибором не привлекая дополнительно отдельные приборы, основанных на малоугловых методах и методах измерения обратного рассеяния.

Как известно, наиболее трудной проблемой при измерениях индикатрис в малых углах является учет паразитного отражения и рассеяния на элементах оптической системы. В связи с этим в настоящее время наибольшее распространение получили так называемые малоугловые методы измерений.

Принцип измерений индикатрис рассеяния малоугловым методом основан на облучении строго определенного объема рассеивающей среды пучком параллельного узконаправленного луча с последующим измерением распределения интенсивности прошедших через этот объем лучей в фокальной плоскости приемного объектива. В виду того, что в фокальной плоскости собирается не только измеряемое рассеянное морской средой излучение, но и значительно более интенсивное паразитное фоновое излучение, включая и прямое ослабленное средой излучение, возникает проблема выделения весьма слабого сигнала на фоне засветки превышающей  $10^5$  раз.

Обычно считается, что корректный учет фоновой засветки можно произвести по предварительно измеренным индикатрисам идеально чистой воды, но практическая реализация такого учета сопряжена с чрезвычайно большими трудностями приготовления чистой воды со стабильными оптическими свойствами. Несмотря на предпринимаемые во многих странах усилия по разработке принципиально новых методов очистки воды, создать оптически чистую воду со стабильными и, самое главное, известными оптическими характеристиками, так до сих пор не удалось. Парадокс заключается в том, что даже, если такая идеально чистая вода будет создана, в области малых углов невозможно проверить ее соответствие

имеющимся теоретическим представлениям с помощью существующих в настоящее время методов.

Автором разработан принципиально новый теневой метод измерений индикатрис в малых углах, основная идея которого состоит в том, чтобы создать схему с настолько малой фоновой засветкой, чтобы можно было производить измерения рассеяния даже в области весьма малых углов без учета нулевого распределения по идеально чистой воде.

Для этого в оптической схеме приведенной на рис.6, перископическая призма размещена вне облучающего пучка света так, чтобы в направлении  $0^\circ$  ее боковая грань совместилась с краем этого пучка параллельно оптической оси всей системы.

В этом случае во всем диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  ни один прямой луч не сможет попасть в приемный объектив, в то время как рассеянные лучи будут восприниматься без всяких помех. При нулевом угле, крайний луч источника света будет скользить вдоль боковой грани, а все остальные прямые лучи пройдут мимо призмы. В результате призма всегда будет находиться в области тени луча и в приемный объектив попадет только рассеянный водой свет.

Для идеально параллельного пучка света, такая схема позволяет полностью избавиться от паразитной фоновой засветки. К сожалению, реальные источники коллимированного светового излучения сами имеют паразитные фоновые лучи, которые все же попадают в приемный объектив, но их интенсивность на несколько порядков меньше интенсивности фона от прямых лучей в малоугловом методе. Величина этого паразитного фона от источника света может быть уменьшена еще на несколько порядков за счет сужения ширины пучка до очень малых размеров при измерениях в малых углах. Для этого в схему введена регулируемая шторка, которая изменяет ширину пучка синхронно с вращением призмы так, чтобы в области от малых углов до примерно  $30^\circ$  пучек был бы предельно узким, а при всех остальных углах — максимальным. Таким образом, в предложенной новой схеме, удалось добиться значительного уменьше-

ния фоновой засветки в малых углах, более чем в  $10^5$  раз. Такое значительное уменьшение достигается тем, что приемное устройство воспринимает только рассеянную морской водой часть излучения из области тени облучающего пучка и, кроме того, за счет применения регулируемой шторки сужающей ширину этого пучка до весьма малых размеров.

В процессе измерений индикатрисы, рассеивающий объем постоянно меняется весьма сложным образом и от точности расчета этого объема во многом зависит точность определения индикатрисы, особенно в непосредственной близости к направлению прямого луча в малых углах и в обратном направлении в углах близких к  $180^\circ$ . Для наглядности рассеивающий объем на рисунке условно выделен заштрихованным прямоугольником для случая угла рассеяния  $90^\circ$ , тогда как положение призмы соответствует измерению ослабления прямого пучка. Закон изменения рассеивающего объема для больших углов с достаточной для практических целей точностью может определяться зависимостью:

$$V(\theta) = V(90^\circ) / \sin \theta, \quad (14)$$

где:  $V(90^\circ)$  – рассеивающий объем под углом  $90^\circ$ , определяемый конструктивными параметрами оптической схемы. Для малых углов вблизи  $0^\circ$  в направлении прямого луча и для обратно рассеянного излучения вблизи  $180^\circ$ , вычисление величины рассеивающего объема выливается в отдельную весьма сложную задачу, от решения которой во многом зависит точность определения индикатрисы рассеяния.

Еще одной немаловажной проблемой в измерении полной индикатрисы рассеяния, является обеспечение оптимальных условий измерений обратно рассеянных лучей в углах в непосредственной близости от  $180^\circ$ . Обычно в существующих приборах максимальный угол, до которых удавалось производить измерения в обратном направлении, ограничивался величиной порядка  $170^\circ$ . Этот угол в большинстве полярных нефелометров определялся габаритами источника света и приемника, поскольку они препятствовали возможности сблизиться, чтобы обеспечить измерения вблизи  $180^\circ$ . В

приборах же специально предназначенных для измерений обратного рассеяния от пучка света неограниченной длины при приближении к  $180^\circ$  происходило резкое увеличение длины рассеивающего объема, вследствие чего возникала неопределенность в результатах измерений из-за влияния многократно рассеянных лучей. Проблему можно решить путем ограничения длины рассеивающего объема до приемлемой оптимальной величины. Все предпринимавшиеся до сих пор попытки ограничения длины рассеивающего объема путем введения по ходу луча, на заданном расстоянии, всевозможных световых ловушек не приводили к положительным результатам из-за появляющейся при этом слишком большой фоновой засветки для обратных направлений.

Автором предложено новое решение этой проблемы путем установки на пути лучей двух хорошо полированных поглощающих стеклянных пластинок под углом  $45$  градусов к оптической оси.

При такой схеме большая часть прямого излучения падающего на полированные пластинки полностью поглощается, поскольку из-за незначительной разницы в показателях преломления стекла и морской воды, отражается лишь несколько долей процента, а за счет большого количества отражений величина паразитного отраженного излучения для рассеяния назад уменьшается более чем в  $10^9$  раз.

За счет этого величина фоновой засветки в обратном направлении была уменьшена до пренебрежимо малого уровня. Незначительное влияние фона в такой схеме измерений ощущается только для экстремально чистых океанских вод, но и в этом случае ее легко можно учесть путем вычитания из общего сигнала.

Конструктивно осветитель фотометрический блок, и двигатель развертки по углу размещены в трех отдельных герметичных контейнерах, расположенных через  $90$  градусов вокруг рабочего объема нефелометра и жестко связанных между собой элементами конструкции (рис. 7.)

Перископическая призма укреплена, во вращающейся в плоскости сканирования обойме, так, чтобы выходная ее

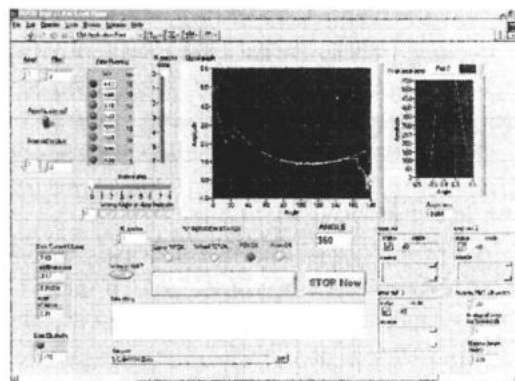
грань была в непосредственной близости от иллюминатора фотометрического блока. При этом боковая грань призмы должна точно совмещаться с осью осветителя в нулевом направлении. Передача вращения от оси двигателя к перископической призме производится с помощью поводка, позволяющего избежать затенения лучей в рабочем объеме во всем диапазоне углов.



Р и с. 7. Измеритель индикатрисы рассеяния света с блоком питания и регистрации

При вращении мотора устройства развертки по углу рассеяния, рассеянное под разными углами излучение непрерывно направляется с помощью перископической призмы внутрь герметичного контейнера фотометрического блока. Прошедшее через иллюминатор излучение фокусируется объективом светоприемного устройства в центре полевой диафрагмы, а затем направляется на входное окно фотоумножителя. Угол зрения светоприемного устройства, определяемый фокусным расстоянием объектива и размером полевой диафрагмы, выбран несколько большим, чем у осветителя. Измерение индикатрисы рассеяния производится при непрерывном вращении перископической призмы, поэтому за каждый ее оборот происходит две съемки полной индикатрисы в диапазоне углов от  $0.5^\circ$  до  $177.6^\circ$ . В момент прохождения нулевого направления измеряется интенсивность прямого ослабленного пучка, на пути от иллюминатора осветителя до входной грани призмы. Ограничение индикатрисы рассеяния в малых углах определяется угловым разрешением нефелометра, а в больших – поперечными размерами перископической призмы, которая на этих углах перекрывает выходящий из осветителя световой пучок.

Для предотвращения попадания в измерительную зону рассеянного солнечного света, рабочий объем нефелометра вместе с вращающейся призмой огражден со всех сторон световой ловушкой, выполненной в виде кюветы. Кювета составлена из двух усеченных конусных чаш из светопоглощающего материала соединенных между собой большими основаниями так, чтобы между ними оставалась круговая щель для прохождения внутрь окружающей воды. Размеры круговой щели и ее длина подобраны из условия, чтобы фоновая засветка эффективно подавлялась, в то время как исследуемая морская вода имела возможность свободно протекать между ними, чтобы обеспечить быструю полную сменяемость измеряемой воды в кювете. Хорошему обмену и тщательному перемешиванию воды в измерительном объеме содействует также вращение перископической призмы, которая в этом случае играет роль своеобразной мешалки. Помимо этого элементы световой ловушки предотвращают возможность появления бликов на поверхностях механических узлов и иллюминаторов осветителя и фотометрического блока. Для дополнительной защиты от паразитных отражений и рассеяний на элементах оптических систем, внутри осветителя и фотометрического блока установлено несколько дополнительных экранирующих диафрагм.



Р и с. 8. Пример выведения результатов измерений рассеяния на монитор

Таким образом, разработанный нами новый принцип измерения индикатрисы рассеяния морской воды позволил создать компактный, быстродействующий полярный нефелометр с высокими мет-

рологических характеристиками, способный производить съемку полной индикатрисы рассеяния во всем диапазоне углов, с записью результатов измерений с помощью современных компьютерных систем сбора, управления и обработки информации (рис. 8).

**Заключение.** Разработанные в соответствии с новой концепцией методы и аппаратура дали возможность проводить целенаправленные исследования биооптических свойств вод в Черном море, используя его акваторию как один из региональных опорных пунктов подспутникового обеспечения. Полученная с помощью этой аппаратуры подспутниковая информация успешно использовалась для анализа и интерпретации цветковых съемок поверхностных вод, в рамках международных проектов «Интеркосмос-Черное море» и SeaWiFS.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ли М.Е., Соловьев М.В., Толкаченко Г.А.* О флюктуациях подводной облученности в открытом океане // Морские гидрофизические исследования. Изд. МГИ, Севастополь, №2, 1975. – С. 86 – 97.
2. *Николаев В.П., Якубенко В.Г.* О связи статистических характеристик подводного светового поля с характеристиками волнения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 14, №1, 1978. – С. 118 – 124.
3. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Гидрооптическая аппаратура для подспутниковых исследований. // Международный научно-технический семинар "Морское и экологическое приборостроение". Изд. МГИ, Севастополь, 1995. – С. 29 – 32.
4. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Изд. МГИ, Севастополь, 2000. – С. 163 – 173.
5. *Пелевин В.Н.* Об измерении показателя истинного показателя поглощения света в море // Изв. АН СССР, Физика атмосферы океана, т.1, №5, 1965. – С. 539 – 545.
6. *Браво-Животовский Д.М., Гордеев Л.Б., Долин Л.С.* Определение показателей поглощения и рассеяния морской воды по некоторым характеристикам светового поля искусственных источников света. // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. М.: Наука, 1974. – С. 153 – 156.
7. *Moore C., Zaneveld J.R.V., Kitchen J.C.* Preliminary results from an in situ spectral absorption meter. // Ocean Optics XI, Proc. SPIE, 1750, 1992. – p. 330 – 337.
8. *Ли М.Е.* Погружаемый автоколлимационный прозрачномер // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Изд. ИТЭФ, Таллин, 1980. – С. 291 – 295.
9. *Ли М.Е., Калинин И.А., Мартынов О.В., Толкаченко Г.А.* Зондирующий прозрачномер с датчиком температуры воды для исследований в прибрежной зоне с маломерных судов // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – С. 32 – 34.
10. *Ли М.Е., Латушкин А.А., Мартынов О.В.* Использование светодиодных квазимонохроматических источников света в аппаратуре для гидрооптических исследований // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – С. 19 – 21.
11. *Petzold T.J.* Volume scattering functions for selected ocean waters // SIO Ref., 1972, 72–28, 79p.
12. *Kullenberg G.* Scattering of light by Sargasso sea water // Deep-Sea Res., 15, 1968. – p. 423 – 432.
13. *M.E.Lee and M.Lewis.* A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean, I J. Atmos. Ocean. Technology, 20, No. 4, p.p.563–571, 2003.
14. *Ли М.Е., Мартынов О.В., Шибанов Е.Б.* Новые принципы измерения индикатрисы рассеяния в широком диапазоне углов // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. МГИ НАНУ, Севастополь, 2003. – 20 с.