

Подспутниковые наблюдения важнейших биооптических параметров в Черном море (новый подход)

Г. К. Коротаев, М. Е. Ли, Г. А. Толкаченко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

Одной из наиболее трудных и важных проблем приморских стран является проблема охраны окружающей среды и контроля состояния морских экосистем на основе эффективных средств наблюдений за экологическим состоянием водных бассейнов. Для Украины эта проблема особенно актуальна в связи с тем, что бассейн Черного моря является полузакрытым и, по существу, оторванным от Мирового океана системой многочисленных морей и узких проливов, а стоки крупных рек, протекающих по территории многих стран восточной Европы, выносятся в шельфовую зону Украины.

Оптические методы контроля состояния водоемов позволяют достаточно эффективно исследовать экологические проблемы водных бассейнов. Эти методы основаны на использовании спектральных различий поглощения, рассеяния и флуоресценции света такими оптически активными примесями водной среды, как фитопланктон, минеральная взвесь и растворенное органическое вещество. В настоящее время интерес к оптическим методам исследования природных вод значительно возрос благодаря интенсивному развитию спутниковой океанологии. Вызвано это тем, что на современном этапе развития спутниковых технологий получения и интерпретации изображений водных акваторий появилась реальная возможность создавать на их основе непрерывно действующие системы диагноза и контроля состояния морских экосистем.

Успешная многолетняя эксплуатация спектрометра МКС (ИСЗ «Интеркосмос-21») и сканера CZCS (ИСЗ «Nimbus 7») способствовала интенсификации исследований в этом направлении и стимулировала дальнейшее совершенствование сканеров цвета. В 1997 году на орбиту были запущены американский спутник SeaStar с уникальным по своим характеристикам сканером цвета нового поколения SeaWiFS и индийский спутник IRS-P3 с прибором MOS на борту. Запуском этих спутников положено начало проведению долгосрочной про-

граммы глобальных наблюдений цвета океана, с целью создания наблюдательной сети за состоянием морской биосферы.

Для совершенствования оптических моделей системы «океан-атмосфера» (и разработанных на их основе алгоритмов обработки и интерпретации спутниковой информации), данные спутниковых измерений необходимо регулярно сравнивать с данными непосредственных биооптических наблюдений с уровня поверхности океана. В связи с тем, что в настоящее время во многих ведущих центрах космических исследований принята долгосрочная программа возобновления глобальных наблюдений за цветом морей и океанов, назрела настоятельная необходимость выработки единых методик и требований к подспутниковым измерениям параметров водной среды. В результате работы рабочей группы проекта SeaWiFS были выработаны рекомендации для всех участников проекта SeaWiFS по перечню необходимых параметров измерений и предложения, которые намечают основные принципы и стратегию подспутниковых биооптических измерений, используемых для разработки алгоритмов и методов контрольно-калибровочных сравнений [9]. Предложения определяют величины, которые должны быть измерены с разумной точностью и содержат детальные требования к методикам и аппаратуре для натурных измерений и калибровок. Главные требования этого проекта состоят в том, чтобы добиться результирующей точности измерений выходящего из воды излучения не хуже 5 % и концентрации хлорофилла «а» для океанических вод порядка 35 % в течение пятилетнего периода работы спутника [8]. В качестве параметров, обязательных для подспутниковых гидрооптических измерений, рабочая группа предложила использовать абсолютные величины спектральных значений облученности и яркости как для прямого сравнения с аналогичными характеристиками, полученными из спутниковых данных сканера SeaWiFS, так и для

расчета производных параметров, необходимых для применения в биооптических алгоритмах.

Нужно отметить, что перечень характеристик предложен рабочей группой с учетом современного состояния биооптических измерений и возможностей их усовершенствования в ближайшее время. Поэтому требования к точности измерений для проекта SeaWiFS значительно выше, чем обычно принято в традиционной гидрооптике. Помимо этого, в число рекомендуемых параметров включены такие, которые еще не получили широкое распространение в океанологии. К их числу относятся такие, как угловое распределение яркости под водой и индикатриса рассеяния. Предложенный подход к проведению гидрооптических подспутниковых измерений требует от фотометров для измерений подводной облученности и яркости наличия столь высоких метрологических характеристик, что они на настоящее время недостижимы не только в экспедиционных условиях, но и в лучших стационарных метрологических лабораториях.

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 их уменьшения 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 работ по унификации методов и приборов для гидрооптических измерений, накопленный в отделе оптики и биофизики МГИ НАН Украины, позволил разработать соответствующие новым задачам унифицированные оптоэлектронные блоки и устройства и реализовать 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 и океанографической платформе.

В последние годы приборы комплекса были существенно модернизированы с таким расчетом, чтобы их характеристики соответствовали рекомендациям рабочей группы SeaWiFS, а набор измеряемых параметров был достаточным для применения в океанологических подспутниковых биооптических экспериментах. В варианте подспутникового обеспечения комплекс аппаратуры включает в себя приборы для измерений коэффициента яркости моря, интегральных характеристик ослабления подводного светового поля и относительного углового распределения яркости под водой. В состав комплекса включены также приборы для измерений спектрального показателя 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° .

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ МОРЯ

Спектрофотометр для измерений спектрального коэффициента яркости моря является одним из основных гидрооптических приборов при проведении океанологических подспутниковых экспериментов, поскольку позволяет решать разнообразные задачи подспутниковых оптико-биологических наблюдений. Один из наиболее совершенных приборов был разработан в отделе оптики и биофизики МГИ НАН Украины [3]. Он представляет собой универсальный спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря, позволяющий решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления. В приборе предусмотрена возможность одновременного измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения моря или яркости небосвода, нормированных на излучение падающей на поверхность моря спектральной облученности. Предусмотрена также возможность работы как с борта исследовательского судна на ходу, 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 отходить на достаточно большое расстояние от судна. Измерения, выполняемые в плавающем варианте, позволяют свести до минимума многие методические погрешности и получать контрольно-калибровочные данные с требуемой для решения биооптических задач точностью. Важно отметить, что измерения коэффициента яркости по предложенной схеме не требуют абсолютной калибровки, поскольку измеряемая величина является отношением световых потоков. Поэтому измерения можно осуще-

ствлять с помощью дифференциального фотометра, калибровка которого производится посредством диффузно рассеивающего экрана и нейтральных ослабителей. Применение дифференциального фотометра позволяет существенно повысить точность измерений, а использование простых и надежных средств калибровки (рассеивающий экран и нейтральные ослабители достаточно компактны и обладают хорошей стабильностью параметров) дает возможность проводить калибровку прибора в экспедиционных условиях.

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО СВЕТОВОГО ПОЛЯ

Традиционным и общепринятым методом определения таких интегральных параметров светового поля, как показатели вертикального ослабления, является вычисление их по данным измерений глубинного относительного хода облученностей и яркости восходящего излучения. Основным недостатком этого метода является сильная зависимость исходных величин облученностей от условий освещения и состояния поверхности моря. Несмотря на то, что во время измерений производится постоянный контроль величины падающего излучения по палубному датчику, а флуктуации облученностей от волнения усредняются, полностью скомпенсировать методические помехи не удается. Значительного уменьшения методических погрешностей от этих факторов удалось добиться путем применения дифференциального метода измерений [4]. Суть его состоит в том, что измерению подвергается разность логарифмов облученностей от двух косинусных коллекторов, разнесенных друг от друга на несколько 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, и только лишь на небольших глубинах. Объясняется это особенностями распределения по глубине статистических характеристик флуктуаций подводной облученности.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ЯРКОСТИ

При натуральных подспутниковых исследованиях проникновения света в море, особенно на мелководье,

недостаточно применять только широко распространенные в настоящее время измерители подводной облученности. Во-первых, требования по точности к измерителям облученности настолько велики, что проблемы с качеством световых коллекторов с косинусной, полусферической или сферической характеристикой становятся весьма ощутимыми. Не меньшей проблемой является также необходимость разработки соответствующих способов определения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние иммерсионного эффекта и отклонение угловой характеристики световых коллекторов от заданного закона. Поэтому при натуральных исследованиях проникновения света на мелководье необходимо привлекать принципиально новые методы измерений характеристик световых полей, позволяющие определять не только ослабление спектральной облученности с глубиной, но и точно знать структуру световых полей по всему профилю. Данные измерений этой важной характеристики позволяют получать не только весьма ценные сведения о структуре распределения лучистых потоков в воде, но и рассчитать все интегральные параметры подводного светового поля, определить коэффициенты диффузного ослабления и отражения, а также оценить значения некоторых первичных оптических характеристик вод.

Различными авторами было создано несколько конструкций морских измерителей углового распределения яркости под водой, которые, однако, не нашли широкого применения в гидрооптике. Из-за сложности конструкции эти приборы были громоздки, неудобны для работы в экспедиционных условиях, имели ограниченные возможности в скорости и количестве получаемой информации. В МГИ НАН Украины был предложен совершенно новый подход, позволяющий производить измерения углового распределения светового поля под водой без вращения громоздкого измерительного фотометра в вертикальном и азимутальном направлениях. Достигается это тем, что фотометр во время измерений остается неподвижным, а свет из разных направлений поступает к нему через два вращающихся зеркала осуществляющих непрерывное сканирование его линией визирования. Эти зеркала объединены оптико-механической системой в устройстве, основанном на принципе работы перископа. За счет этого удалось упростить процесс измерений и резко повысить скорость и количество получаемой информации, поскольку шаг сканирования может выбираться гораздо меньшим, чем это допускают приборы. Измерения яркости в различных направлениях осуществляются методом сканирования линией визирования, с помощью специальной перископической насадки, закрепляемой на неподвижном спектрофотометре [6]. За счет высокой инфор-

мативности такого метода измерений одновременно решается и сложнейшая проблема определения под водой угловых координат, поскольку сведения о них заложены в самом измеряемом световом поле. Сканирующий измеритель углового распределения яркости под водой может быть рекомендован для проведения тщательных интеркалибровочных измерений при проведении биооптических подспутниковых экспериментов. В этом случае можно провести совместные измерения одной и той же характеристики в одинаковых условиях с помощью сканирующего яркомера и обычного измерителя облученности. Затем данные расчетов по формулам использовать для обоснования результатов измерений измерителей облученности путем их сравнения.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВОД

В отличие от параметров светового поля, первичные оптические характеристики являются неизменными свойствами рассеивающей среды, не зависящими ни от условий освещения, ни от трансформации излучения в процессе его распространения в воде. 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 и физически обоснованные аналитические модели поля восходящего излучения и алгоритмы обработки биооптической информации.

Из первичных гидрооптических характеристик наиболее существенными для целей подспутникового обеспечения являются спектральный показатель поглощения и индикатриса рассеяния, а также производные от них характеристики, такие как спектральные показатели ослабления и рассеяния назад. Разработке методов измерений спектрального показателя поглощения в разное время было посвящено много работ, но до сих пор решить эту проблему с достаточной для практических нужд точностью пока не удается. Неоднократно предпринимались попытки использовать прямые методы измерений спектрального показателя поглощения морских вод. Наиболее распространенным является метод измерений с применением зеркальной отражающей трубы, внутри которой размещается исследуемая среда. Построенные по этому принципу приборы в последние годы стали находить практическое применение при гидрооптических исследованиях, но используют их лишь для приблизительных оценок спектрального поглощения морских вод. Большинство из существующих методов явля-

ются косвенными. Они основаны на измерении различных характеристик при прохождении светового излучения сквозь водную среду. Разработанный в МГИ НАН Украины метод основан на определении спектрального показателя поглощения по измерениям спектров коэффициента яркости водной среды [10]. Стимулом для разработки этого метода послужили работы по развитию средств дистанционного определения цвета океана. Обоснованием для его использования в океанологических и экологических исследованиях явилась возможность измерений с высокой точностью больших величин коэффициента яркости в тех спектральных участках, где значения показателя поглощения природных вод слишком малы для количественных определений. При использовании этого метода измерения спектральных коэффициентов яркости выполняются полевым измерителем коэффициента яркости моря (диапазон длин волн — 320...730 нм, спектральное разрешение — 10 нм). Определение спектров поглощения проводится с помощью итерационной процедуры. Для предварительного определения формы кривой спектрального поглощения используется функция, пропорциональная ожидаемому спектральному показателю обратного рассеяния света и обратно пропорциональная спектральному коэффициенту яркости моря. Путем сопоставления полученных функций с табличными значениями находятся спектры мнимой части показателя преломления, после чего рассчитываются действительные части этого показателя. Затем на основе теории Ми вычисляются спектры обратного рассеяния и поглощения.

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УГЛОВ

Наиболее полное представление о рассеивающих свойствах морской среды можно получить по измерениям индикатрис рассеяния света в возможно более широком диапазоне углов. Измерители индикатрис рассеяния весьма сложны и громоздки, поэтому чаще всего применяются для работы в лабораторных условиях. Кроме того, эти приборы не дают возможности измерять индикатрису рассеяния во всем диапазоне углов рассеяния, поэтому приходится пользоваться различными приборами отдельно для малых и больших углов, используя при этом разные методы измерений. До настоящего времени не было прибора, который позволил бы с необходимой точностью измерять полную индикатрису рассеяния света. В то же время проведенные исследования показывают, что индикатрису необходимо измерять в возможно более широком диапазоне углов: от нескольких минут до 180°. В отделе оптики

и биофизики МГИ НАН Украины был разработан полярный нефелометр, в котором большинство из перечисленных выше недостатков существующих приборов удалось устранить [7].

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 к 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 измерение ослабления прямого пучка.

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. Ввиду того, что в фокальной плоскости собирается не только измеряемое рассеянное морской средой излучение, но и значительно более интенсивное паразитное фоновое излучение и прямое ослабленное средой излучение, возникает проблема выделения весьма слабого сигнала на фоне засветки, превышающей полезный сигнал в 10^5 раз.

Основная идея разработанного в МГИ НАН Украины принципиально нового теневого метода измерений индикатрис в малых углах состоит в том, чтобы создать схему с настолько малой фоновой засветкой, чтобы можно было производить измерения рассеяния даже в области весьма малых углов. Для этого в оптической схеме перископическая призма размещена вне облучающего пучка света так, чтобы в направлении 0° ее боковая грань совместились с краем этого пучка параллельно оптической оси всей системы. В этом случае во всем диапазоне углов от 0° до 180° 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.

Еще одной немаловажной проблемой в измерении полной индикатрисы рассеяния, является обеспечение оптимальных условий измерений обратно рассеянных лучей в углах в непосредственной близости от 180° . Обычно максимальный угол в обратном измерении ограничивался значением 170° . Этот угол в большинстве полярных нефелометров определялся габаритами источника света и приемника, поскольку они препятствовали возможности сблизиться, чтобы обеспечить измерения вблизи 180° . В приборах же, специально предназначенных для измерений обратного рассеяния от пучка света неограниченной длины, при приближении к 180° происходило резкое увеличение длины рассеивающего объема, вследствие чего возникала неопределенность в результатах измерений из-за влияния многократно рассеянных лучей. Проблема была решена путем ограничения длины рассеивающего объема до приемлемой оптимальной величины с помощью установки на пути лучей двух хорошо полированных поглощающих стеклянных пластинок под углом 45° 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 пренебрежимой. Незначительное влияние фона в такой схеме измерений ощущается только для экстремально чистых океанских вод, но и в этом случае ее легко учесть путем вычитания из общего сигнала.

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.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТА

В качестве параметра, характеризующего меру ослабления света, удобно использовать показатель ослабления направленного излучения (прозрачность) морской воды. Для измерения этого параметра создано множество конструкций прозрачных 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.

Для целей подспутникового обеспечения необходимо было разработать такую схему прозрачномера, которая, с одной стороны, обладала бы высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов, а с другой — обеспечивала возможность перемены оптической базы даже в полевых условиях. При разработке было найдено оригинальное решение [1], которое в дальнейшем было усовершенствовано применением автоколлимационной оптической схемы с трипель-призмой в качестве отражающего элемента [2]. Ход лучей в такой автоколлимационной схеме при различных ориентациях призмы относительно оси измерительного пучка света не изменяется. Поэтому можно плавно изменять длину оптической базы прозрачномера

простым перемещением или перестановкой призмы вдоль оси пучка, поскольку юстировка прибора при этом не нарушается. Следовательно, появляется возможность практически неограниченно расширять диапазон измерения показателя ослабления излучения, поскольку даже в сильно отличающихся по своим оптическим свойствам средах удается производить их в оптимальных условиях с одинаковой относительной погрешностью.

При такой оптической схеме измеряемая среда заполняет пространство между иллюминатором и трипель-призмой, обладающей свойством в широких пределах, независимо от ее ориентации в пространстве, отражать излучение в направлении, строго противоположном падающему излучению. Из-за сильной вытянутости морских индикатрис рассеяния, углы зрения фотоприемника и расходимости пучка света получаются чрезвычайно малыми, что предъявляет очень высокие требования к постоянству юстировки прибора, к сохранению хода лучей при переходе из воздуха в воду.

Возможность легко изменять в широких пределах длину оптической базы прозрачномера 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.

ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПИГМЕНТОВ ФИТОПЛАНКТОНА

Концентрацию хлорофилла и феофитина определяли по методике ИнБЮМ НАН Украины с помощью флуориметрического метода [5].

Для измерений интенсивности флуоресценции пигментов использовали флуориметр, собранный совместно с сотрудниками МГИ НАНУ на базе прибора СПЕКОЛ. Флуориметр снабжен первичным абсорбционным синим фильтром СС-8. В приборе имеется возможность использовать сменные вторичные флуоресцентные фильтры для различных пигментов. Для хлорофилла «а» применяли

красный фильтр КС-17. Погрешность измерений составляет 1 %. Порог чувствительности по хлорофиллу — 0.04 мкг/л. Калибровку прибора производили по химически чистому хлорофиллу «а», выделенному из культур водорослей методом бумажной хроматографии. Концентрацию хлорофилла для калибровки рассчитывали спектрофотометрически, используя удельный коэффициент экстинкции, равный 89.3 л/г·см. Проверку прибора производили по флуоресцентному контрольному стеклу.

Для измерений концентраций пигментов пробы фитопланктона фильтровали на мембранные фильтры «Sartorius» с диаметром пор 0.3 мкм объемом 200—300 мл и стекловолоконные фильтры GF-F объемом 500 мл. Фильтры хранили менее двух недель в морозильной камере холодильника. Экстракцию производили 90 % раствором ацетона в течение 18 ч при температуре 6—8 °С.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПОДСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Методика подспутниковых экспериментов вытекает из требований получения опорно-калибровочных данных на регулярной основе. На начальном этапе развития спутниковых методов проблема получения опорных контрольно-калибровочных данных по всему Мировому океану решалась путем анализа и обобщения имеющихся архивных материалов многочисленных судовых экспедиционных наблюдений. Для сравнения использовались хорошо известные карты глобального распределения таких параметров, как, например, глубины видимости белого диска, индекса цвета и первичной продукции. Это было связано главным образом с невысокими метрологическими характеристиками и низким пространственным разрешением спутниковой аппаратуры, а также с отсутствием детальной информации о процессах переноса излучения в системе океан-атмосфера. В дополнение к этому эпизодически проводились специализированные крупномасштабные подспутниковые эксперименты с привлечением научно-исследовательских судов, океанографических платформ и самолетов-лабораторий. Эти исследования позволили в целом выявить возможности спутниковых методов изучения глобальных биооптических явлений в морях и океанах, а также сформулировать требования к спутниковой аппаратуре и к оптическим приборам подспутникового обеспечения. В связи с разработкой долгосрочной программы глобальных наблюдений за цветом морей и океанов необходимо принять методику получения качественных опорно-калибровочных данных подспутниковых наблюдений на регулярной основе с разумной достаточностью и при невысокой сто-

имости полевых работ.

Разработанная в МГИ НАН Украины методика ориентирована на использование в качестве носителей аппаратуры океанографической платформы МГИ и малотоннажных плавсредств общего назначения. На платформе размещается научное оборудование для стационарных круглосуточных наблюдений в автоматическом режиме большого количества основных и дополнительных океанографических параметров. Близкое расположение платформы от береговой черты не позволяет использовать ее в полной мере для некоторых подспутниковых экспериментов, особенно для калибровки спутников с невысоким пространственным разрешением. Для устранения этого недостатка наблюдения с платформы периодически дополняются измерениями с борта маломерного судна вдоль меридионального разреза с удалением до 10 км от берега.

Для отработки вопросов, связанных с внедрением предложенной методики проведения подспутниковых наблюдений, в 2001 г. была организована специализированная экспедиция МГИ НАНУ, в которой исследования проводились в районе расположения океанографической платформы (пос. Качивели). Выбор этой точки определялся не только удачным расположением платформы для такого рода исследований, но и наличием в районе платформы соответствующей инфраструктуры (транспортные магистрали, узлы связи, причалы, береговые посты и др.), которая позволяет существенно снизить стоимость полевых измерений.

Основной целью экспедиционных работ являлась отработка методов выполнения натуральных измерений на уровне морской поверхности для калибровки спутниковой аппаратуры видимого и микроволнового диапазонов. Задачи исследований включали отработку средств и методов для получения данных об оптико-биологических характеристиках морской воды, динамике морской поверхности и приводного слоя атмосферы, а также регистрации данных о средних и пульсационных характеристиках морской воды и атмосферы в районе океанографической платформы.

Работы на платформе включали измерения: вышешней поверхностных волн струнным волнографом, характеристик обрушений гребней волн, пространственно-временных характеристик поля поверхностных волн, проведение съемки морской поверхности в видимом диапазоне спектра с помощью видео- и фотокамер, измерения индикатрис рассеяния света в морской воде и выполнение стандартных гидрометеонаблюдений.

С борта катера измерялись следующие параметры: спектральный коэффициент яркости моря в диапазоне 320—730 нм; подводная облученность сверху на горизонтах от поверхности до глубины

30 м; глубина видимости стандартного белого диска; цветность моря по шкале Фореля—Уля; температура воды на поверхности моря; температура воздуха на высоте 2 м над уровнем моря; скорость ветра на высоте 3 м и вертикальный профиль температуры воды до глубины 45 м. Одновременно с измерениями океанографических параметров проводился отбор проб для определения концентраций хлорофилла и феопигментов, а также для измерения индикатрис рассеяния света.

Накопленный в экспедиции опыт работ и полученные результаты позволяют приступить к построению системы для получения опорных контрольно-калибровочных данных о биооптических свойствах морских вод на Черном море. Это даст возможность включиться в работу различных международных организаций в качестве иностранных представителей одного из региональных опорных пунктов программы SeaWiFS и, таким образом, наряду с другими известными океанологическими центрами, участвовать в работах по разработке спутниковых методов слежения за состоянием морской экосистемы. Участие МГИ НАН Украины в различных международных программах по проблемам исследования цвета океана из космоса предоставит ему доступ к спутниковой информации любого уровня, а также даст возможность получения материальной и финансовой поддержки в виде разовых поставок научного оборудования или частичной оплаты расходов на проведение региональных подспутниковых экспериментов.

1. Ли М. Е. Логарифмический фотометр-прозрачномер для видимой и ультрафиолетовой областей спектра // Мето-

дика и аппаратура для гидрофизических исследований. — Киев: Наук. думка, 1969.—Т. 41.—С. 180—188.

2. Ли М. Е., Крашенинников Б. Н. Автоколлимационный спектральный прозрачномер // Тез. докл. Междунар. конф. «Проблемы Черного моря». — Севастополь: Изд-во МГИ, 1992.—10 с.
3. Ли М. Е., Мартынов О. В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых вод и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: Изд-во МГИ, 2000.—С. 163—173.
4. Ли М. Е., Мартынов О. В. Гидрооптическая аппаратура для подспутниковых исследований // Междунар. научно-технический семинар «Морское и экологическое приборостроение». — Севастополь: Изд-во МГИ, 1995.—С. 29—32.
5. Юнев О. А., Берсенева Г. П. Флуорометрический метод определения концентрации хлорофилла «а» и феофитина «а» в фитопланктоне // Гидробиол. журн.—1986.—22.—С. 89—95.
6. Haltrin V. I., Lee M. E., Martynov O. V. Rapid hydrologic measurements of underwater angular distribution of light // Proc. of the Twelfth international conference and workshops on applied geologic remote sensing. — Denver (USA): Publ. by ERIM, 1997.—Vol. 1.—P. 361—368.
7. Haltrin V. I., Lee M. E., Martynov O. V. Polar nephelometer for sea truth measurements // Proc. Second Internat. airborne remote sensing conf. and exhibition. — San Francisco (California, USA): Publ. by ERIM, 1996.—Vol. II.—P. 444—450.
8. Hooker S. B., Esaias W. E., Feldman G. C., et al. An overview of SeaWiFS and ocean color // SeaWiFS technical report series.—1992.—1.—25 p.
9. Muller J. L., Roswell W. A. Ocean optics protocols for SeaWiFS validation // SeaWiFS technical report ser.—1992.—5.—4 p.
10. Tolkachenko G. A., Martynov O. V., Shybanov E. B. Retrieval of absorption spectra of phytoplankton cultures by reflectance measurements // Proc. Internat. conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2001)». — St. Petersburg (Russia): Publ. by D. S. Rozhdestvensky Optical Society, 2001.—P. 236—242.