

М.Е.Ли, Г.А.Толкаченко, В.И.Маньковский,
Е.Б.Шибанов, О.В.Мартынов, Е.Н.Корчемкина

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ПОДСПУТНИКОВЫЕ ГИДРООПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

Дано описание подспутниковых биооптических экспериментов, проводившихся на океанографической платформе Морского гидрофизического института НАН Украины в течение 30-ти лет. Приводятся некоторые научные результаты исследований, краткие описания приборов гидрооптического комплекса, применявшихся и разработанных методик измерений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *океанографическая платформа, дистанционное зондирование, гидрооптика, биооптические эксперименты, прозрачность, рассеяние, ослабление, коэффициент яркости.*

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. Достаточно тесные взаимосвязи между оптическими и биологическими характеристиками морских вод послужили основой для обоснования перспективности применения космических методов слежения за состоянием природных водоемов.

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 наблюдательные системы для диагноза и контроля состояния морских экосистем.

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 моря. Для отработки вопросов, связанных с внедрением методов проведения подспутниковых наблюдений и развития средств космических исследований океана в видимой области спектра с 1980 г. в Морском гидрофизическом институте (МГИ) НАН Украины проводились работы по созданию наблюдательной системы на базе стационарной океанографической платформы Экспериментального отделения (ЭО) МГИ в пгт.Кацивели. 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 и др.), что позволяет существенно снизить стоимость полевых измерений.

Близкое расположение платформы к береговой черте не позволяет использовать ее в полной мере для некоторых экспериментов, особенно для калибровки спутников с невысоким пространственным разрешением. Для устранения этого недостатка, измерения с помощью стационарно расположенной на платформе аппаратуры были дополнены измерениями с борта маломерных судов вертикальной структуры гидрофизических полей с удалением до 5 км от берега.

По результатам теоретических исследований и целенаправленных экспедиционных работ на океанографической платформе было показано, что экологические проблемы водных бассейнов можно исследовать, используя принципиально новые оптические методы диагностики состояния водоемов. Основной целью экспедиционных работ на платформе являлась отработка методов выполнения натурных измерений на уровне морской поверхности для калибровки спутниковой аппаратуры видимого диапазона. Задачи исследований включали отработку средств и методов для получения данных об оптико-биологических характеристиках морской воды, динамике морской поверхности и оптических параметрах атмосферы в районе океанографической платформы.

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 моря МГИ, 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 океанографической платформе и на научно-исследовательских судах. В варианте подспутникового обеспечения комплекс аппаратуры включает в себя приборы для измерений таких параметров, как коэффициент яркости моря, интегральные характеристики ослабле-

ния подводного светового поля и относительное угловое распределение (те-ло) яркости под водой. 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° в обратном направлении.

Разработанные приборы широко использовались при проведении крупных комплексных экспериментов с участием экспедиционных судов, самолета- лаборатории АН 30, автоматизированных ИСЗ и пилотируемых орбитальных станций.

Подспутниковые измерения по национальным и международным программам, проектам и грантам. Основной объем исследований отдела оптики моря осуществляется по заданиям НАН Украины по проекту «Спутниковая океанология», раздела 4 этого проекта: «Разработка измерительно-информационных технологий спутникового мониторинга и подспутникового обеспечения», а также по проектам «Течение-МГИ», «Экосистема», «Информатика» и «*Black Sea GOOS*».

Значительная часть исследований выполнялась также по заданиям Национального космического агентства Украины: «Разработка способов и методов глобального и регионального мониторинга морей, океанов и Азовско-Черноморского бассейна с получением спутниковых и наземных данных» по контракту ДЗ-9 проекта «Зондування».

Дополнительные возможности в расширении объемов исследований были использованы отделом путем активного участия в различных проектах Министерства по делам науки и технологий и Министерства образования и науки Украины.

В проекте «Обеспечение океанологических исследований современными инструментальными системами» работы выполнялись по теме: «Разработка многофункционального оптического зонда, предназначенного для использования в измерительных системах массового сбора океанологической информации для диагностики состояния морских экосистем», а также по теме: «Разработка гидрооптического модуля для прибрежной буйковой станции».

В проекте «Наблюдение» работы были связаны с исследованием оптических свойств атмосферы над морем и выполнялись по теме: «Разработка структурной схемы солнечного фотометра, предназначенного для измерения яркости солнечного диска, спектральной прозрачности атмосферы и оптической плотности аэрозоля».

Значительный объем работ был выполнен в рамках многих международных программ и грантов. Эти работы начались с международного гранта №525-4003-03F0107A германского федерального Министерства исследований и технологий по двум проектам: «База данных океанологических исследований» и «Программа измерений с океанографической платформы», утвержденных этим министерством в поддержку совместных исследований Германии с научно-исследовательскими институтами СНГ. Оба проекта являлись развитием международной спутниковой программы по дистанционному определению цвета океана «*MOS-PRIRODA*», участником которой

МГИ являлся в течение более десяти лет.

В это же время были начаты работы по международному проекту: «Разработка алгоритмов *SeaWiFS* применительно к исследованиям Черного моря», который прошел конкурсный отбор Национального аэрокосмического агентства Соединенных Штатов Америки. По итогам конкурса МГИ был утвержден в качестве иностранного участника программы США: «*NASA NRA-92-OSSA-7*». При поддержке *NASA* был проведен ряд международных подспутниковых экспериментов на океанографической платформе и с борта научно-исследовательских судов МГИ. Позднее совместные с американскими специалистами подспутниковые эксперименты были продолжены в рамках другого международного гранта *NASA SIMBIOS* по проекту: «Долговременные подспутниковые наблюдения важнейших биооптических и аэрозольных параметров в Черном море».

Разработка новых методов и аппаратуры для подспутниковых исследований проводилась в рамках совместного со Скрипссовским институтом океанографии (*SIO*) международного гранта США *CRDF* № *UG1-299 (Civilian Research & Development Foundation)* по проекту: «Подспутниковые гидрооптические приборы для морского обеспечения данных космических измерений сканера *SeaWiFS* и разработка регионального биооптического алгоритма для Черного моря».

Работы по созданию нового полярного нефелометра с уникальными характеристиками выполнялись при поддержке канадской фирмы «*Satlantic*» и Дальхаузского университета в рамках международного гранта в форме партнерского договора № *P-012* Украинского Научно-Технологического Центра (УНТЦ) по проекту: «Дистанционное зондирование поверхности океана». В дальнейшем эти работы были продолжены совместно с американской фирмой «*AMPAC, Inc. (Aerospace mass properties analysis, Inc)*» по международному партнерскому проекту УНТЦ № *P-131* «Разработка нового подхода и прибора для измерений угловой функции рассеяния морской воды в широком диапазоне углов рассеяния». Отработка отдельных узлов нефелометра проводилась в полевых условиях на океанографической платформе.

Участие в международных комплексных экспедициях. Первые подспутниковые эксперименты в Черном море с привлечением стационарной океанографической платформы были организованы и проведены нами в начале восьмидесятых годов. Эксперименты проводились в сотрудничестве со специалистами из многих стран и были направлены на решение задач по дистанционному определению оптических характеристик водных масс с выходом на показатели биологической продуктивности. Работы были выполнены в соответствии с планом мероприятий международной Рабочей группы по дистанционному зондированию Земли в рамках международного комплексного проекта "Изучение Мирового океана с учетом атмосферы". В рамках этого проекта, под общим названием "Черное море – Интеркосмос", были осуществлены комплексные аэрокосмические эксперименты с использованием ИСЗ «Интеркосмос-20», «Интеркосмос-21» и орбитальной станции «Салют-7». Основной целью этих экспериментов являлись отработка, проверка и совершенствование новых методик дистанционного зондирования моря для определения биооптических параметров водной среды [1].

Программа подспутниковых исследований включала в себя синхронные и независимые измерения океанологических характеристик водной толщи, параметров восходящего излучения в видимой области спектра и оптических свойств атмосферы с судна «Профессор Колесников», со стационарной океанографической платформы, и самолета-лаборатории АН-30. Полученные в период 1983 – 1985 гг. данные после первичной обработки были сосредоточены в депонированных в ВИНТИ шести томах «Материалов экспериментов «Черное море – Интеркосмос». Основные научные результаты этих экспериментов позже были опубликованы в трех томах сборника «Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы» [2 – 4].

В рамках совместных работ, проводимых Институтом океанологии РАН и МГИ по программе «НАСА-Мир», в июле – сентябре 1996 г. на океанографической платформе была выполнена интеркалибровка российской и украинской оптической аппаратуры и выполнены подспутниковые измерения по обеспечению опорными контрольно-калибровочными данными пролетов орбитальной станции "МИР" и индийского спутника *IRS* у южного побережья Крыма. На обоих спутниках были установлены идентичные сканеры видимого диапазона *MOS*, которые хорошо зарекомендовали себя в совместных экспериментах на ИСЗ «Интеркосмос-21».

Для отработки вопросов, связанных с внедрением предложенной методики проведения подспутниковых наблюдений, в рамках программы *Black Sea GOOS* в июле – октябре 2001 г. была организована специализированная экспедиция МГИ, в которой исследования проводились в районе расположения океанографической платформы. Эти исследования на платформе включали измерения: вертикальной стратификации полей прозрачности и температуры, коэффициента яркости моря, спектральных показателей ослабления и индикатрис рассеяния света в морской воде, концентраций хлорофилла и пигментов феофитина, а также выполнение стандартных гидрометеорологических наблюдений. 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-Уле; 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 воды для определения концентраций пигментов микроводорослей и для измерений индикатрис рассеяния света.

Показатель вертикального ослабления дневного света определяли по результатам измерений подводной облученности сверху на длине волны 525 нм на различных горизонтах (0; 5; 10; 15; 20; 25 и 30 м) с помощью подводного фотометра ПИГО [5]. Концентрацию пигментов (хлорофилла и феофитина) определяли в лабораторных условиях Института биологии южных морей (ИнБЮМ) НАН Украины флуориметрическим методом [6]. На разрезах проводили измерения относительной прозрачности и цвета воды, спектрального коэффициента яркости моря, подводной облученности и вертикальных профилей температуры. Кроме этого, осуществлялся отбор проб на

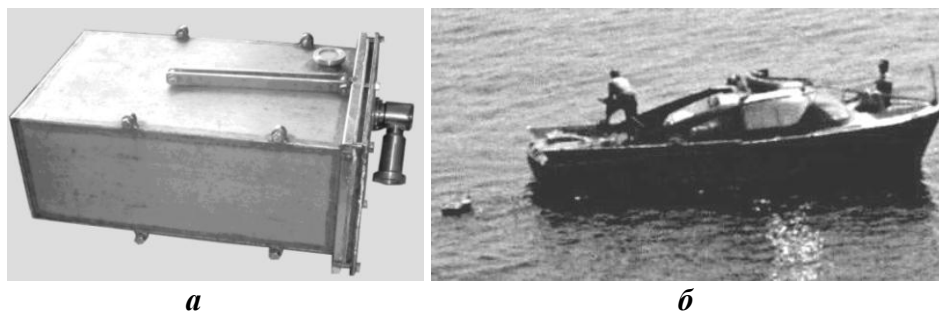
поверхности моря для определения спектров поглощения взвешенным веществом и растворенной органикой [7].

Спектральные коэффициенты яркости моря определяли с помощью разработанного в МГИ дифференциального фотометра «Спектр» [8]. В приборе реализована схема измерений спектральной яркости восходящего излучения, нормированного на величину падающей на поверхность моря солнечной радиации. Измерения спектрального коэффициента яркости моря фотометром «Спектр» в 2001 – 2003 гг. проводили на широтных и меридиональных разрезах с борта катера. Внешний вид прибора и процесс измерений с его помощью коэффициента яркости моря показаны на рис.1.

Изучение пространственных структур гидрооптических характеристик проводили на основе анализа профилей показателя вертикального ослабления света α на семи меридиональных разрезах. По результатам измерений подводной облученности на глубинах рассчитывали показатели вертикального ослабления нисходящего солнечного излучения α на длине волны 525 нм. Вертикальную оптическую структуру вод на разрезах 7 и 22 августа 2001 г в целом можно охарактеризовать как трехслойную: верхний, приблизительно 5 м слой с величинами $\alpha = 0,045 - 0,065 \text{ м}^{-1}$; промежуточный слой 5 – 15 м прозрачных вод, где $\alpha = 0,030 - 0,045 \text{ м}^{-1}$; нижний слой 15 – 30 м наиболее мутных вод, в которых величины α на глубинах более 20 м превышали, как правило, $0,060 \text{ м}^{-1}$. Высокие значения α в нижнем слое были связаны с наличием на глубинах 20 – 30 м слоя скачка, на верхней границе которого обычно наблюдаются повышенные концентрации фитопланктона [9].

Одной из интегральных характеристик спектров яркости является эффективная длина волны выходящего из моря излучения $\lambda_{\text{эфф}}$ [10]. Существенным достоинством $\lambda_{\text{эфф}}$ является ее тесная связь с параметрами подводного светового поля, которые, в свою очередь, зависят от концентраций растворенных и взвешенных в воде веществ. Диапазон изменчивости этого параметра в период экспедиции 2002 г. составлял 489 – 512 нм при изменчивости концентраций хлорофилла от 0,45 до 2,04 мг·м⁻³.

Были выявлены связи относительной прозрачности, как с поверхностной концентрацией хлорофилла, так и с суммарной по слою. Оценки концентраций хлорофилла в поверхностном слое по эффективной длине волны коэффициента яркости приводят к результатам, полученным при подготовке к подспутниковому эксперименту «Интеркосмос – Черное море» [10].



Р и с . 1 . Внешний вид плавающего спектрофотометра «Спрут» (а) и процесс измерений с его помощью коэффициента яркости моря (б).

Данные, полученные в этих экспериментах, охватывали значительный диапазон изменений биооптических свойств моря и могут широко использоваться для количественных сопоставлений с оценками концентраций хлорофилла, полученным космическими сканерами *MERIS*, *MODIS* и *SeaWiFS* [11].

В период с 16 по 29 июля 2002 г. на океанографической платформе специалистами МГИ, ИнБЮМа и Лаборатории Прибрежной Океанографии Университета Литтораль Опалового Берега (Дюнкерк, Франция) проводился специально спланированный подспутниковый эксперимент по программе совместных исследований в рамках международного проекта Космического Агентства Франции (*CNES*) и проекта НАН Украины «Спутниковая океанология». Финансовая поддержка экспериментальных исследований осуществлялась по проекту Космического Агентства Франции «Долговременные атмосферные, биооптические и гидрологические наблюдения в Черном море для валидации сканера *MERIS*».

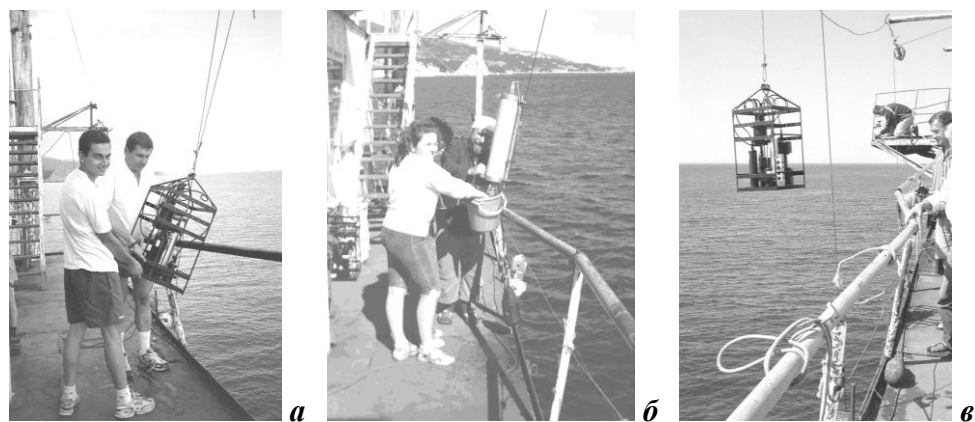
Целью эксперимента являлся сбор данных о пространственно-временной изменчивости гидрофизических и биооптических параметров морской воды для совершенствования региональных алгоритмов обработки спутниковых измерений сканерами *MERIS*, *MODIS* и *SeaWiFS* в прибрежном районе Черного моря.

Эти работы были продолжены летом 2003 г. 22 и 28 июля было выполнено два меридиональных разреза с борта катера. На разрезах проводились измерения вертикальных профилей температуры до глубины 43 м, определения глубины видимости белого диска и цветности моря. Отбирались пробы с поверхности воды для определения спектров поглощения воды взвешенными в воде частицами и растворенной органикой, а также определения индикатрисы рассеяния. Для изучения вертикальной структуры подводного светового поля 28 июля 2003 г. были проведены измерения поля подводной облученности до глубины 30 м.

При исследованиях с борта катера проводился отбор проб для определения индикатрис рассеяния света и оценки значений концентрации хлорофилла «а» и феофитина. Проводились определения глубины видимости стандартного белого диска Z_d и цвет воды $N_{цв}$ в баллах по шкале цвета морских вод. Выполнялись также измерения вертикальной структуры поля температуры до глубины 43 м и оптических характеристик воды (по показателю вертикального ослабления света в поверхностном слое) [12].

Исследования биооптических характеристик включали: измерения спектрального распределения коэффициента яркости моря, индикатрис рассеяния морской воды в четырех участках видимого спектра, глубины видимости белого диска, цвета моря по шкале цветности, определение концентраций пигментов фитопланктона, измерение спектров поглощения света взвешенным веществом, детритом и фитопланктоном [13]. Метеорологические наблюдения в течение эксперимента обеспечивались сотрудниками ЭО МГИ. На рис.2 приведены снимки эпизодов биооптических измерений в 2003 г.

Улучшенное пространственное разрешение цветowych сканеров новой генерации позволяет более эффективно использовать наблюдения на платформе для калибровки спутниковых измерений. В этой связи время выполнения наблюдений на платформе согласовывалось со временем измерений



Р и с . 2 . Эпизоды биооптических измерений в 2003 г: Подготовка к зондированию многоканальной аппаратуры специалистами Франции (а), отбор проб для биооптических исследований (б), рабочий момент измерений спектральной яркости моря (в).

сканерами *MERIS*, *MODIS* и *SeaWiFS*.

Регулярные наблюдения на платформе проводились с 27 июля по 15 августа. Измерения атмосферной оптической толщи выполнялись французскими специалистами каждые полчаса с 9.00 до 17.00. Измерения падающего и восходящего излучения на поверхности моря и спектрального коэффициента яркости проводились каждый час. Кроме того, 5 – 6 раз в день измерялась глубина видимости белого диска. Высокая частота перечисленных выше измерений позволяет проследивать изменчивость оптических свойств моря и атмосферы и получить представления об их суточном ходе во время эксперимента.

Измерения концентрации хлорофилла «а» и феофитина, спектров поглощения и индикатрисы рассеяния проводились в пробах, отбравшихся на глубинах 0, 4, 8, 12, 16 и 20 м. Отбор проб осуществлялся один или два раза в день; в 11.00 и 14.00.

Выбор времени выполнения станций с отбором проб соответствовал пролету в районе Кацивели спутников со сканирующими спектрометрами *MERIS* (11.00), *SeaWiFS* (13.00) и *MODIS* (14.00).

Всего за время работ выполнено около 320 циклов измерений атмосферной оптической толщины, 110 измерений падающего и восходящего излучения, 92 измерения коэффициента яркости моря и 105 наблюдений глубины видимости белого диска. Было отобрано 136 проб для определения спектров поглощения и индикатрисы рассеяния. Регулярно проводились наблюдения скорости и направления ветра, температуры воды и воздуха, давления, балльности облачности (по 10-ти балльной шкале) и волнения (по 8-ми балльной шкале). Результаты совместного украинско-французского эксперимента опубликованы в [12 – 15]. Полученные данные по свойствам атмосферы над Черным морем были использованы для обоснованного выбора метода коррекции атмосферы при определении цвета моря из космоса.

Выполненный эксперимент показал возможность проведения комплексных биооптических наблюдений на океанографической платформе в

Кацивели, пригодных для валидации и калибровки продуктов цветковых сканеров. В условиях лета 2002 г. на платформе удалось наблюдать редкий случай интенсивного роста концентрации планктона и соответственно значительных изменений характеристик поглощения и рассеяния. Эти данные, охватывающие значительный диапазон изменений биооптических свойств моря, должны быть использованы в дальнейшем для количественных сопоставлений с данными сканеров *MERIS*, *MODIS* и *SeaWiFS*.

В период с 2006 по 2008 гг. на борту НИС «Океания» Института океанологии Польской Академии наук (ИО ПАН) и на океанографической платформе ЭО МГИ проводились экспедиционные работы по договору о научном сотрудничестве между ПАН и НАН Украины. Цель проекта заключалась в получении и обработке натурных данных о региональных особенностях морской воды в контексте спутникового мониторинга морской среды в Балтийском и Черном морях. Эксперименты были разработаны для валидации данных нового Европейского сканера *MERIS* на борту спутника *ENVISAT*. Этот проект позволил оценить спектральную изменчивость оптических свойств морской воды и подводного светового поля в контрастных регионах. Второй целью проекта являлась передача накопленных знаний, опыта и возможностей экспертизы между партнерами, особенно в части передачи в ИО ПАН накопленных в МГИ передовых методов измерений рассеяния света.

Смысл работы заключался в сборе данных о световых полях в различных типах морских вод с целью определения оптических параметров воды и совершенствовании алгоритмов обработки результатов дистанционных измерений для сканера *MERIS*. Рассматривался также и вопрос о применении разработанных в МГИ методов измерений рассеяния света и утверждении их в качестве стандарта для ИО ПАН.

Для украинской стороны особый интерес представляли возможности пополнения базы данных МГИ натурными данными о региональных особенностях оптических характеристик вод Балтийского и Черного морей в широком диапазоне их изменчивости. Это позволило заметно расширить область применения измерительной аппаратуры для подспутниковых измерений, а также усовершенствовать биооптические модели клеток фитопланктона и взвешенного неорганического вещества.

Польская сторона изучала опыт МГИ в области измерений рассеяния света и использовании его при создании контрольно-измерительной аппаратуры.

Обе стороны выразили удовлетворение существенным увеличением количества измеряемых в подспутниковых исследованиях параметров и улучшением качества измерений. Были собраны данные для выяснения региональных расхождений оптических свойств вод Балтийского и Черного морей и использования полученных знаний для разработки дистанционных методов контроля морских экосистем.

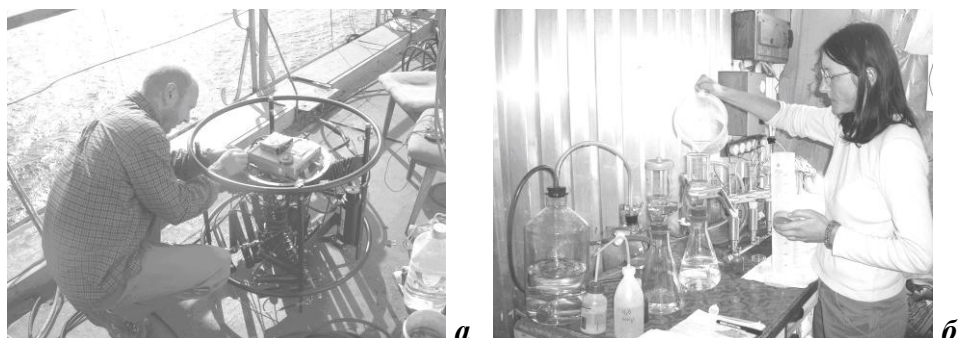
С украинской стороны в экспериментах использовались: измеритель прозрачности и температуры, спектральный нефелометр и измеритель спектральной яркости моря, а также производился отбор проб морской воды с различных горизонтов. На рис.3 показаны батометр 6 л для отбора проб воды, измеритель прозрачности и температуры и спектрофотометр для дистанционных измерений коэффициента яркости моря.



Р и с . 3 . Фрагмент рабочей палубы платформы. На переднем плане – батометр для отбора проб, в руках оператора – измеритель стратификации прозрачности и температуры, на мостке установлен фотометр «Спектр» для измерений коэффициента спектральной яркости моря (а); внешний вид спектрофотометра «Спектр» для дистанционных измерений коэффициента яркости моря (б).

Польская сторона использовала приборы: *RAMSES*, системы ТРИО (Oldenburg, Германия) – для измерений скалярной и векторной яркости с 190 каналами в области 350 – 900 нм с разрешением 3,3 нм (измерения обычно выполнялись в глубинах: 1; 2; 3; 5; 7; 10 и 15 м), подводный спектрофотометр AC-9, *WetLabs*, США – для измерений профилей показателя ослабления и поглощения света в 9 спектральных каналах: 412 – 715 нм, *Hydroscat-4* – измеритель обратного рассеяния света (420; 470; 532 и 700 нм) (*NOBILab*, США) и подводную систему ИО ПАН (Польша) для измерений углового распределения тела яркости (23 датчика). Для определения концентраций пигментов микроводорослей при анализе проб воды использовалось оборудование высокоэффективной жидкостной хроматографии *HPLC*, а также определялись концентрации общей взвеси *TSM* и органического углерода *POC* на приборах ИО ПАН (рис.4).

На океанографической платформе была организована опорная гидрооптическая станция для квазинепрерывных (наблюдения проводились в свет-



Р и с . 4 . Работа на платформе специалистов ИО ПАН. Подготовка к измерениям системы быстродействующих датчиков для измерений углового распределения тела яркости (а), анализ проб воды для определения концентраций пигментов микроводорослей (б).

лое время суток с интервалом 1 ч) измерений оптических характеристик воды и их вертикальной стратификации. С платформы выполнялись также исследования спектральной и угловой функции рассеяния света и прозрачности воды в поверхностном слое моря. Работы на платформе включали измерения спектрального коэффициента яркости моря в диапазоне 320 – 730 нм, вертикальных профилей температуры и прозрачности воды, отбор проб и измерения индикатрис рассеяния света в морской воде и выполнение стандартных гидрооптических наблюдений (глубина видимости белого диска и цвета моря). Работы производились для разработки модифицированных алгоритмов обработки результатов космической съемки моря сканерами *MERIS* и *MODIS* [16].

Аппаратура и методики измерений.

Оптические параметры моря и атмосферы. Вертикальное распределение показателя ослабления света. Измерения вертикального распределения показателя ослабления света и температуры производились измерителем прозрачности и температуры [17] (рис.3, а).

Спектральные показатели ослабления света. Измерения спектрального распределения показателя ослабления выполнялись с помощью лабораторного автоколлимационного прозрачномера ЛАП [18] на пробах воды, отбравшихся с поверхности моря – ведром, а из глубинных слоев – батометром.

Индикатрисы рассеяния света. Индикатрисы рассеяния измерялись с помощью многоканального измерителя объемной функции рассеяния [19] на пробах воды, отбравшихся с поверхности моря – ведром и с разных глубин – батометром.

Относительная прозрачность и цвет воды. Относительная прозрачность (глубина видимости белого диска) и цвет воды измерялись с нижних мостков платформы (высота над уровнем моря 5 м) при волнении до 3 баллов. Использовались стандартный белый диск и шкала цветности морских вод (шкала Фореля – Уле). Измерения выполнялись с интервалом в 1 ч.

Спектры коэффициента яркости моря. Спектрофотометр «Спектр» [8] устанавливался с южной (мористой) стороны платформы на конце мостика, выступающего за край платформы на 3 м (рис.3). Это позволяло проводить измерения без затенения платформой поверхности моря, находящейся в поле зрения фотометра до 14 ч. Измерения выполнялись при волнении до 3 баллов и стабильных условиях освещения.

Оптические характеристики атмосферы. Измерения оптических характеристик атмосферы с океанографической платформы выполнялись с целью совершенствования региональных алгоритмов коррекции влияния атмосферы при валидации спутниковых изображений, а также оценки значений пространственной корреляции поля спектральной прозрачности атмосферы. Измерения проводились одновременно с интервалом 15 мин двумя пространственно разнесенными солнечными фотометрами на длинах волн 440; 500; 675 и 870 нм видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра. Пятый участок спектра на длине волны 936 нм использовался для определения концентрации водяного пара (паров осажденной воды (ПОВ) в сантиметрах). Непосредственно на океанографической платформе измерения яркости солнечного диска выполнялись переносным фотометром *MICROTOPS II*.

Солнечный фотометр *CIMEL-318* [20] был стационарно установлен в Севастополе (станция *Sevastopol* международной сети *AERONET*). Спектральные участки фотометра *MICROTOPS II* совмещены с положением спектральных участков фотометра *CIMEL-318*. Метрологические характеристики и методики калибровок обоих приборов также полностью совпадают. Солнечные спектрофотометры для измерений оптических характеристик атмосферы показаны на рис.5.

Подспутниковые наблюдения. 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 [21]. Он представляет собой универсальный спектрофотометр «Спрут» для измерений коэффициента яркости моря, позволяющий решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления. Предусмотрена также возможность работы как с борта исследовательского судна на ходу судна, так и непосредственно с поверхности моря на гидрологических станциях (рис.1). Для этого прибор снабжен дополнительными поплавками и подводным парусом, которые позволяют ему плавать по поверхности моря и отводиться на достаточно большое расстояние от судна. Для дистанционных измерений коэффициента яркости моря с борта платформы по аналогичной схеме был разработан дифференциальный спектрофотометр «Спектр», показанный на рис.3.

Важно отметить, что измерения коэффициента яркости по предложенной схеме не требуют абсолютной калибровки, поскольку измеряемая величина является отношением световых потоков. Поэтому измерения можно осуществлять с помощью дифференциального фотометра, калибровка которого производится посредством диффузно рассеивающего экрана и нейтральных



Р и с . 5 . Солнечные спектрофотометры для измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем: фотометр *CIMEL-318* (стационарно установлен на здании МГИ в Севастополе) (а); переносной спектрофотометр *MICROTOPS II* (использовался для измерений с океанографической платформы и экспедиционных судов) (б).

ослабителей. Применение дифференциальных фотометров 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 удастся. Значительного уменьшения методических погрешностей от этих факторов удалось добиться путем применения дифференциального метода измерений [21]. 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 первичных оптических характеристик морских вод. 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. 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. Такая аппаратура (АС-9) использовалась и на платформе во время совместных экспедиций Украина-Франция 2002 – 2004 гг. и Украина – Польша 2007 г.

Большинство из существующих в настоящее время методов являются косвенными. Они основаны на измерении различных характеристик при прохождении светового излучения сквозь водную среду. Разработанный в МГИ метод основан на определении спектрального показателя поглощения по измерениям спектров коэффициента яркости водной среды [8]. Стиму-

лом 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) в качестве которых используются спектрофотометры «Спрут» (рис.1) или «Спектр» (рис.3). 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. Многоканальный измеритель объемной функции рассеяния MVSM (рис.6) разработан в отделе оптики моря МГИ. В приборе реализован новый принцип измерений углового показателя рассеяния света, впервые позволивший измерять показатель рассеяния в спектральном диапазоне от 380 до 780 нм в диапазоне углов от 0,5 до 179° [21]. Благодаря этому в ходе многочисленных экспериментов на океанографической платформе, в оптических лабораториях США и Европы удалось обнаружить, что спектрально-угловые свойства рассеяния света водой, не содержащей крупных частиц, будут соответствовать теоретическим расчетам только в том случае, если неоднородности пространственно самосогласованны и представляют собой двумерную систему дефектов, пронизывающую весь объем воды [22].

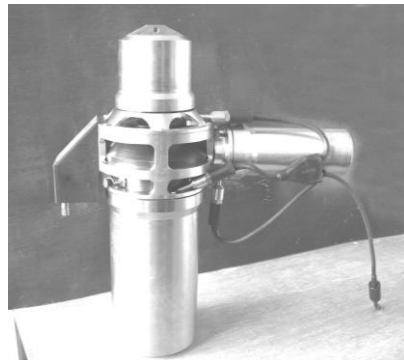


Рис. 6. Внешний вид многоканального измерителя объемной функции рассеяния MVSM.

Измерение спектрального показателя ослабления направленного света. 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 [18], которое в дальнейшем было усовершенствовано применением автоколлимационной оптической схемы с трипель-призмой в качестве отражающего элемента. Ход лучей в такой автоколлимационной схеме при различных ориентациях

призмы относительно оси измерительного пучка света не меняется. 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, удастся производить их в оптимальных условиях с одинаковой относительной погрешностью.

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 стандартной методике с помощью флуориметрического метода [6].

Для измерений интенсивности флуоресценции пигментов использовали флуориметр, собранный совместно с сотрудниками МГИ 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 прибором 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.

Зондирующий прозрачномер с датчиком температуры воды для исследований в прибрежной зоне с маломерных судов. Малогабаритный измеритель прозрачности и температуры собран на полупроводниковых элементах [17]. Установка датчика температуры в измеритель прозрачности позволяет получать дополнительную информацию о формировании вертикальной структуры гидрооптических полей. Микроконтроллер ADuC812 фирмы *Analog Devices* оцифровывает аналоговые сигналы датчиков и формирует кадр в последовательном коде. Далее уровни выходных сигналов микроконтроллера преобразуются в уровни стандарта RS-232 для передачи данных по кабелю в бортовой компьютер. Применение микроконтроллера позволило отказаться от традиционных для отдела оптики моря методов передачи не-

скольких аналоговых сигналов посредством частотной модуляции или с помощью многожильного кабеля. По сравнению с частотной модуляцией существенно упростилась электрическая схема прибора, значительно сократилось время на ее изготовление и настройку.

Методика проведения подспутниковых экспериментов. 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 [1 – 4]. Эти исследования позволили в целом выявить возможности спутниковых методов изучения глобальных биооптических явлений в морях и океанах, а также сформулировать требования, как к спутниковой аппаратуре, так и к оптическим приборам подспутникового обеспечения.

Разработанная в МГИ 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.

Накопленный в экспедициях 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 и, таким образом, наряду с другими известными океанологическими центрами, участвовать в работах по разработке спутниковых методов слежения за состоянием морской экосистемы. Участие МГИ 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 оборудова-

ния или частичной оплаты расходов на проведение региональных подспутниковых экспериментов.

Основные результаты гидрооптических исследований на платформе.

1. На основании успешного проведения ряда международных комплексных подспутниковых экспериментов, на базе стационарной океанографической платформы, экспедиционных судов, авиационных и космических носителей, показана целесообразность и перспективность использования стационарной океанографической платформы ЭО МГИ для решения ряда задач по развитию методов и средств для валидации данных спутниковых определений биооптических параметров морской воды.

2. Разработана и испытана современная методика подспутниковых наблюдений и создан подспутниковый комплекс гидрооптических приборов, по своим возможностям соответствующий известным аналогам в мире. С использованием этого уникального комплекса приборов были успешно проведены многие эксперименты по национальным и международным программам.

3. Экспедиционные биооптические исследования и эксперименты на океанографической платформе позволили МГИ многократно участвовать в многолетних международных программах и грантах, что открывает широкие пути для дальнейшего международного сотрудничества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведешин Л.А., Толкаченко Г.А. Океанографические эксперименты по программе "Интеркосмос" // Иссл. Земли из космоса.– 1986.– № 5.– С.118-119.
2. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы / Под ред. В.А.Урденко, Г.Циммермана.– Москва-Берлин-Севастополь: Изд-во ИКИ АН ГДР, 1985.– 272 с.
3. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. Программа «ИНТЕРКОСМОС» / Под ред. В.А.Урденко, Г.Циммермана.– Москва-Берлин-Севастополь: Изд-во ИКИ АН ГДР, 1987.– т.2, ч.1.– 219 с.
4. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. Программа «ИНТЕРКОСМОС» / Под ред. В.А.Урденко, Г.Циммермана.– Москва-Берлин-Севастополь: Изд-во ИКИ АН ГДР, 1987.– т.2, ч.2.– 197 с.
5. Вайнерман Б.А. Измерение фотосинтетически активной радиации в океане / Световые поля в океане.– М.: Наука, 1980.– С.39-49.
6. Юнев О.А., Берсенева Г.П. Флуориметрический метод определения концентрации хлорофилла «а» и феофитина «а» в фитопланктоне // Гидробиологический журнал.– 1986.– т.22, № 2.– С.89-95.
7. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П. Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль – август 2002 г.) // Морской гидрофизический журнал.– 2004.– № 4.– С.39-50.
8. 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: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.– С.163-173.
9. Толкаченко Г.А., Маньковский В.И., Соловьев М.В. Гидрооптические наблюдения в прибрежных водах Крыма летом и осенью 2001 г. // Сборник работ МГИ по программе Black Sea GOOS.– С.93-99.
10. Урденко В.А., Халтурин В.И., Афонин Е.И. Эмпирические связи между гидро-

оптическими и биологическими характеристиками и параметрами светового поля // Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы.– Берлин: ИКИ АН ГДР, 1985.– С.209-249.

11. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Толкаченко Г.А.* и др. Опыт совместного анализа синхронных in situ и спутниковых измерений биооптических характеристик в прибрежной зоне Черного моря (Кацивели – 2001) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.2(7).– С.100-110.
12. *Берсенева Г.П., Толкаченко Г.А., Мартынов О.В.* Летняя динамика пигментов фитопланктона и ее связь с оптическими параметрами в шельфовых водах Черного моря (2001-2002 гг.) // Морской гидрофизический журнал.– 2006.– № 3.– С.36-51.
13. *Коротаев Г.К., Хоменко Г.А., Шами М., Берсенева Г.П., Мартынов О.В., Ли М.Е., Шибанов Е.М., Чурилова Т.Я., Кузнецов А.С., Куклин А.К.* Международный подспутниковый эксперимент на океанографической платформе МГИ (п.Кацивели) // Морской гидрофизический журнал.– 2004.– № 3.– С.28-38.
14. *Chami M., Shybanov E.B., Churilova T.Y., Khomenko G.A., Lee M.E.-G., Martynov O.V., Berseneva G.A., Korotaev G.K.* Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) // J. Geophys. Res.– 2005.– 110, C11020. doi:10.1029/2005JC003008
15. *Chami M., Shybanov E.B., Khomenko G.A., Lee M.E.-G., Martynov O.V., Korotaev G.K.* Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment // Applied Optics.– 2006.– v.45, № 15.– P.3605-3619.
16. *Коротаев Г.К., Ли М.Е., Толкаченко Г.А.* Подспутниковые наблюдения важнейших гидрооптических параметров в Черном море (новый подход) // Космічна наука і технологія.– 2002.– т.8, № 2/3.– С.231-238.
17. *Ли М.Е., Мартынов О.В., Толкаченко Г.А.* Зонд-стратификатор для изучения пространственной структуры полей прозрачности и температуры // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки ГЕО-UA 2008. 1-а Всеукр. конф. з запрошенням закордонних учасників. Київ, 3-5 червня 2008 р.– Київ: Наукова думка, 2008.– С.62-64.
18. *Маньковский В.И., Кайгородов М.Н.* Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой // Автоматизация научных исследований морей и океанов. 5-я Всесоюзн. шк.– Севастополь: МГИ АН УССР, 1980.– С.91-92.
19. *Ли М.Е., Мартынов О.В., Шибанов Е.Б.* Новые принципы измерения индикаторы рассеяния в широком диапазоне углов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.8.– С.194-211.
20. *Толкаченко Г.А., Holben B.N., Ли М.Е., Коротаев Г.К.* Автоматизированная система контроля параметров атмосферы // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.– С.24-32.
21. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Гидрооптическая аппаратура для подспутниковых исследований. // Междунар. научно-техн. семинар “Морское и экологическое приборостроение”.– Севастополь, МГИ НАН Украины, 1995.– С.29-32.
22. *Шибанов Е.Б.* Влияние структурных неоднородностей воды на рассеяние света // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.20.– С.139-144.

Материал поступил в редакцию 26.10.2010 г.