

УДК 681.785.554+551.463.5

В. С. Горяинов, М. Хасенова, К. Г. Антоненко, А. А. Бузников
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Лабораторный измеритель гидрооптических характеристик на основе волоконно-оптического спектрометра

Многие из компонентов природных вод, участвующих в экологически значимых процессах, оптически активны, вследствие чего оптические характеристики водоемов связаны с их экологическим состоянием и биологической продуктивностью. Исследование процессов поглощения и рассеяния излучения природными водами имеет большое значение, среди прочего – как основа для оптических методов дистанционного зондирования Мирового океана с аэрокосмических носителей. Широкое внедрение чувствительных многоэлементных приемников на основе приборов с зарядовой связью привело к появлению компактных и быстродействующих спектрометров, однако однократное прохождение излучения через кювету зачастую недостаточно для выделения характерных особенностей проб природных вод. В разработанной авторами статье лабораторной установке для измерения характеристик ослабления и рассеяния излучения пробами воды используется отражение светового пучка от вертикального зеркала для удвоения длины оптического пути. С использованием волоконно-оптического спектрометра получены спектры ослабления и рассеяния в диапазоне 450...900 нм с разрешением 1 нм. Установлены корреляционные зависимости между показателями рассеяния и ослабления. Выделены признаки, позволяющие различать и группировать между собой рассмотренные природные водоемы.

Природные воды, первичные гидрооптические характеристики, ослабление света, рассеяние света, волоконно-оптические спектрометры

Чистая вода весьма слабо взаимодействует с электромагнитным излучением в диапазоне от ближнего ультрафиолета до ближней инфракрасной области. Так, для морской воды как раствора солей натрия и калия в чистой воде минимум поглощения расположен вблизи 400 нм, в то время как к длинам волн 200 и 800 нм показатель поглощения a асимметрично возрастает на три порядка [1]. Существенное влияние на распространение излучения оказывают процессы рассеяния, проявляющиеся даже в очень чистой воде: в этом случае излучение рассеивается на ее молекулах. Результаты тщательных измерений показывают, что показатель рассеяния в чистой воде подчиняется закону Рэлея и обратно пропорционален четвертой степени длины волны излучения (λ^{-4}). Присутствие ионов в концентрациях, характерных для морской воды (соленость $S = 35\text{--}39\%$)

повышает показатель рассеяния в диапазоне длин волн 350...600 нм на 30 % по сравнению с чистой пресной водой [2].

Таким образом, основной вклад в формирование оптических свойств природных вод вносят разного рода примеси – как растворенные, так и присутствующие в виде взвеси. Многие из компонентов, участвующих в экологически значимых процессах, оптически активны. Так, например, фитопланктон – главный первичный продуцент, лежащий в основании пищевых цепей Мирового океана [3], – селективно поглощает излучение в синей (с максимумом на длине волны 440 нм) и красной (с максимумом на 675 нм) областях спектра благодаря содержанию в его клетках хлорофилла – основного фотосинтезирующего пигмента. Присутствие других пигментов, в частности красно-оранжевых каротиноидов, расширяет мак-

симум поглощения в синей области и приводит к появлению дополнительных пиков в спектре поглощения [4]. Интенсивность и спектральное распределение поглощения изменяются также в зависимости от размера клетки и концентрации в ней пигментов (под воздействием так называемого эффекта упаковки) [5]. Кроме того, хлорофилл, феофитины и фикобилины способны к флуоресценции, максимум суммарной интенсивности которой приходится на красную область спектра [6].

Растворенное органическое вещество (РОВ) представляет результат разложения белков растительного и животного происхождения, попадающих в водоемы с речным стоком или непосредственно в результате гибели водных организмов. Спектр поглощения излучения оптически активной частью РОВ в видимой области приблизительно описывается убывающей экспоненциальной зависимостью [7]. В качестве теоретического объяснения этому предложена зависимость интенсивности поглощения от количества поглощающих химических связей в длинных органических молекулах: более многочисленные одиночные связи активнее поглощают коротковолновое излучение [1]. Вклад растворенного органического вещества в упругое рассеяние (при котором поглощенные фотоны переизлучаются на исходной длине волны) весьма мал, однако определенная доля органики возбуждается излучением в ближней ультрафиолетовой и синей частях спектра и флуоресцирует в широких полосах, максимум которых может приходиться на синезеленую или зеленую область.

Кроме того, в природных водах присутствуют взвешенные частицы различных размеров и происхождения – как органического (бактерии и прочие микроорганизмы, не содержащие хлорофилла), так и неорганического (продукты эрозии горных пород, слабо растворимые оксиды металлов и кальциевые экзоскелеты одноклеточных). Поглощение и рассеяние света взвесью во многом определяет воспринимаемый цвет водной поверхности, а также ограничивает глубину фотической зоны, в которой возможен фотосинтез. В целом спектральная зависимость коэффициента рассеяния излучения взвесью соответствует упомянутому ранее закону Рэлея, однако более точно коэффициент рассеяния определяется теорией Ми, принимающей во внимание также коэффициент преломления и размеры рассеивающих частиц [8]. Рассеяние излучения частицами взвеси

неизотропно: максимум индикатрисы (объемной функции) приходится на исходное направление, в котором распространялось излучение, а по мере увеличения угла рассеяния θ до 90° значение индикатрисы рассеяния $\beta(\theta)$ может уменьшиться более чем на 4 порядка [9]. Измерения показывают, что эта закономерность ярче выражена в прибрежных водах, чем в прозрачной воде океана [10].

Таким образом, оптические свойства природных вод оказываются напрямую связаны с их экологическим состоянием и биологической продуктивностью. Исследование процессов поглощения и рассеяния излучения природными водами имеет большое значение, среди прочего – как способ получения опорных данных для оптических методов дистанционного зондирования Мирового океана с аэрокосмических носителей.

Оптические характеристики природных вод разделяют на первичные и вторичные [11]. К первой группе относят коэффициенты поглощения a и рассеяния b , а также объемную функцию рассеяния β , а также другие характеристики, значения которых определяются только свойствами самой водной среды, без учета интенсивности и геометрии падающего излучения. Вторую группу составляют характеристики, отражающие влияние как свойств среды, так и распространяющегося в ней света, например коэффициент диффузного ослабления K_d .

Целью данной работы было создание лабораторной установки и методики ее применения для измерения характеристик ослабления и рассеяния оптического излучения пробами природных вод.

Ранние исследования оптических свойств вод Мирового океана были вынуждены ограничиваться визуальными наблюдениями, например оценкой максимальной глубины видимости белого диска. В конце XIX в. была сделана попытка ночных измерений прозрачности воды с электрической лампой в качестве источника излучения, а также предложена шкала эталонных смесей для оценки цвета поверхности водоемов. В период между двумя мировыми войнами началось активное применение актинометров на основе фотоэлементов для оценки распределения дневной освещенности по глубине и характеристик ослабления солнечного излучения в воде [12].

Новый этап усовершенствования лабораторных и натуральных методов измерений пришелся на середину XX в., когда широкое распространение

получили фотоэлектронные умножители и интерференционные фильтры, позволившие регистрировать малый световой поток в узких спектральных диапазонах. В конце 1950-х гг. в Институте океанологии им. П. П. Ширшова был разработан комплекс гидрооптической аппаратуры, позволивший проводить систематические измерения в рейсах научно-исследовательских судов [13].

Недостатком спектральных измерений с использованием монохроматоров или узкополосных оптических фильтров была их трудоемкость, связанная с длительной последовательной регистрацией спектра при помощи одиночного фотоприемника. Широкое внедрение чувствительных многоэлементных приемников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) привело к появлению компактных и быстродействующих спектрометров, допускающих регулировку чувствительности посредством задания времени накопления заряда.

Авторами статьи был использован компактный волоконно-оптический спектрометр USB650 Red Tide производства компании «Ocean Insight». Этот прибор выполнен по асимметричной скрещенной схеме Черни–Тернера с входным фокусным расстоянием 42 мм и выходным фокусным расстоянием 68 мм, обеспечивающей полуширину разрешаемой линии 2 нм в спектральном диапазоне 350...980 нм. Приемником излучения служит кремниевая ПЗС-линейка Sony ILX-511 из 650 элементов размером 14×200 мкм. Время интегрирования может быть задано в пределах от 3 мс до 65 с. Результаты измерения оцифровываются 12-разрядным АЦП, а для передачи данных и управления спектрометр подключается к компьютеру через USB-порт [14].

Измерение малых значений коэффициента ослабления, характерных для морской воды, требует удлинения оптического пути, проходимого светом. При однократном прохождении излучения через кювету широко распространенных размеров (10...20 мм толщины) оптический путь оказывается слишком коротким для выделения характерных особенностей проб природных вод. Из литературы известны примеры измерений, проведенных при помощи кювет длиной 50 см [15] и даже в бассейне, с оптической базой порядка десятков метров (с использованием лазеров с различной длиной волны) [16].

Однако кюветы большей толщины усложняют юстировку измерительной установки и требуют отбора проб большого объема. Кроме того, если ширина кюветы намного меньше ее длины, то возникают затруднения, связанные с попаданием на приемник света, отраженного от стенок кюветы. Распространенный способ увеличения оптической базы без излишнего удлинения прибора состоит в добавлении в его конструкцию одного или нескольких зеркал [17]. Многократное отражение света между тремя вогнутыми зеркалами равной кривизны позволило увеличить оптическую базу до 10 м и проводить измерения в океанической воде [18].

В описываемом лабораторном измерителе для удлинения оптического пути используется вертикальное зеркало, отделенное кюветой от источника излучения и приемной оптической системы.

Схема разработанной лабораторной установки приведена на рис. 1. Источником излучения с непрерывным (тепловым) спектром служит галогенная

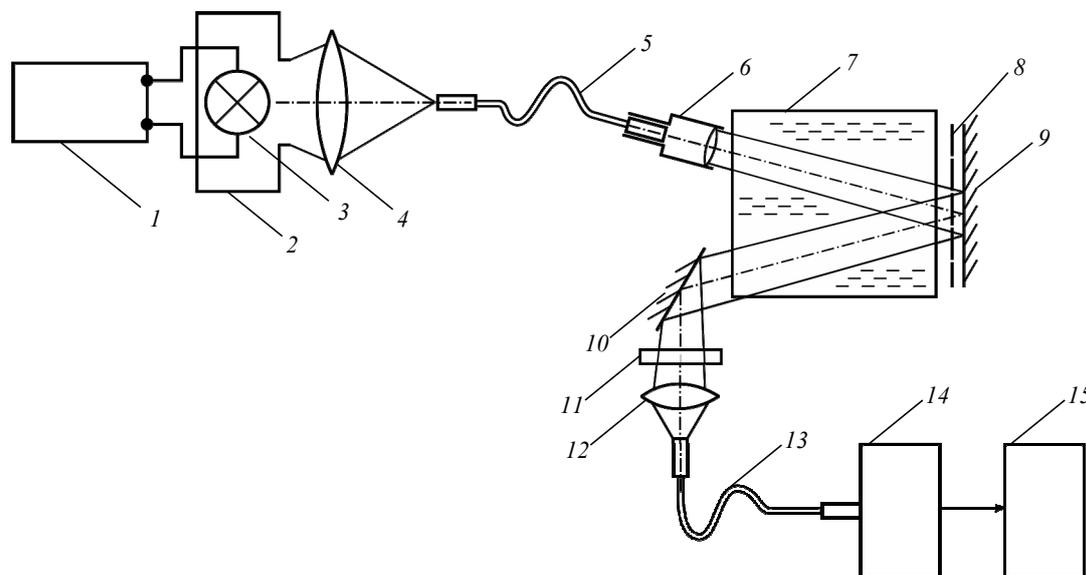


Рис. 1

лампа накаливания 3, установленная в непрозрачном кожухе 2. Лабораторный источник 1 обеспечивает ее питание стабилизированным током.

Излучение лампы фокусируется собирающей линзой 4 на торец волоконного оптического волновода 5, противоположный конец которого установлен в коллиматоре 6, формирующем световой пучок с относительно малой расходимостью. Коллиматор размещен под небольшим углом относительно горизонтали, по возможности ближе к торцу кюветы 7 толщиной 50 мм. Для юстировки и калибровки системы кювета заполняется дистиллированной водой, а при проведении измерений в нее заливают пробу воды.

У дальнего торца кюветы установлено вертикальное зеркало 9, отражающее излучение в направлении приемной оптической системы. Для измерений характеристик обратного рассеяния зеркало закрывается непрозрачной заслонкой 8, показанной на рисунке штриховой линией.

Наклонное зеркало 10 поворачивает пучок излучения к собирающей линзе 12, в фокусе которой закреплен торец оптического волновода 13. Для выделения отдельных участков спектра или изменения суммарного потока излучения между линзой и зеркалом может устанавливаться фильтр 11 – цветное стекло с необходимыми характеристиками пропускания. Зеркало, фильтр, линза и разъем для крепления волновода жестко закреплены на общем держателе, который может перемещаться по вертикали и по горизонтали (в плоскости рис. 1 и перпендикулярно ей), а также наклоняться относительно вертикали благодаря системе линейных трансляторов и винтов.

По волноводу 13 излучение попадает на вход спектрометра 14, с которого данные измерений передаются на компьютер 15 при помощи USB-интерфейса.

Выбор волоконных световодов для подвода излучения к кювете и от кюветы к спектрометру обусловлен двумя соображениями. Во-первых, расходимость некогерентного светового пучка в воздухе достаточно велика по сравнению, например, с излучением лазера, поэтому целесообразно по возможности уменьшить расстояние, проходимое светом за пределами кюветы, где на него не влияют оптические свойства пробы воды. Во-вторых, для уменьшения влияния преломления света, чтобы длину пути излучения в воде можно было считать приблизительно равной удвоенной толщине кюветы, угол наклона коллиматора от-

носительно горизонтали выбран малым. Вследствие этого вертикальное расстояние между центрами светового пучка на входе в кювету и на выходе из нее мало, что требует компактности от конструкции приемной оптической системы. На рис. 1 угол наклона коллиматора и, соответственно, вертикальное смещение пучка увеличены для наглядности.

При использовании когерентного источника излучения (например, лазера) возможно увеличение числа проходов излучения через кювету с двух до четырех-пяти. Для этого необходимо сместить вертикально держатель приемной оптической системы вместе с зеркалом (10, рис. 1), а на освободившееся место установить еще одно зеркало, наклоненное нижним краем (согласно рис. 1) от стенки кюветы. При этом наклон коллиматора следует еще уменьшить, чтобы на высоту вертикального зеркала приходилось 2 и более отражения.

На первом этапе работы с измерителем было зарегистрировано спектральное распределение яркости источника излучения в качестве опорного спектра $I_{M\lambda}$. Для этого в отсутствие кюветы 7, зеркала 9 и заслонки 8 коллиматор 6 был направлен прямо на зеркало 10, а затем перемещением держателя с приемной оптической системой был достигнут максимальный уровень сигнала на входе спектрометра. Перед этим и всеми последующими измерениями регистрировался уровень темного шума $I_{D\lambda}$ при выключенной лампе накаливания.

Описания методик лабораторных измерений оптических характеристик воды, имеющиеся в литературе, подчеркивают влияние отражения света от стенок кюветы, снижающее точность получаемых результатов [19]. Для борьбы с этим эффектом рекомендуется помещать кювету во внешнюю емкость, наполненную водой или бензолом. Второй этап калибровки и тестирования разработанной установки должен был ответить на вопрос об интенсивности $I_{R\lambda}$ излучения, отражающегося от стенок, и необходимости такой меры для борьбы с ним.

В этом эксперименте схема установки соответствовала рис. 1, за исключением только пустой кюветы и отсутствия заслонки 8. Результат измерения показал, что максимум коэффициента отражения от стенок пустой кюветы, т. е. отношения $I_{R\lambda}/I_{0\lambda}$, приходится на инфракрасный край распределения и не превышает 0.012. Таким сла-

бым отражением было решено пренебречь, не принимая дополнительных мер.

Следующий этап заключался в регистрации интенсивности излучения, прошедшего через пустую кювету, $I_{E\lambda}$. Данная величина отражает общие потери излучения в системе в отсутствие исследуемой пробы.

Затем при той же схеме кювета была заполнена дистиллированной водой, и зарегистрировали распределение спектральной яркости излучения, дважды прошедшего через кювету, $I_{W\lambda}$. При этом юстировка приемной системы была проведена заново с учетом смещения выходного пучка излучения из-за преломления в воде.

Далее аналогичные измерения были повторены для каждой из проб природных вод, при этом зарегистрированы спектры $I_{T\lambda}$.

Для регистрации спектра рассеяния назад $I_{S\lambda}$ зеркало 9 закрывалось заслонкой 8. Положение приемной оптики при этом не менялось, но соответствующим образом увеличивалось время интегрирования, как указано в табл. 1 ($\tau_{\text{инт}}$ – длительность интегрирования). Были получены спектры рассеяния излучения дистиллированной водой и пробами природных вод.

Таблица 1

Величина	$\tau_{\text{инт}}$, мс
$I_{M\lambda}$	10
$I_{R\lambda}$	500
$I_{E\lambda}$	100
$I_{W\lambda}$	60
$I_{T\lambda}$	100
$I_{S\lambda}$	4000

Для каждой пробы и типа эксперимента регистрировалось по 20 повторений. Полученные спектры пропускания и рассеяния усреднялись, а также рассчитывалось среднее квадратическое отклонение σ . С учетом пренебрежимо малой яркости излучения галогенной лампы в синей области спектра и роста поглощения водой в ближней инфракрасной в качестве пределов рабочей области измерений были выбраны длины волн 450 и 900 нм.

По усредненным спектрам были рассчитаны натуральный показатель ослабления

$$\mu'(\lambda) = \frac{1}{2d} \ln \left(\frac{I_{0\lambda} - I_{D\lambda}}{I_{T\lambda} - I_{D\lambda}} \right) \quad (*)$$

и натуральный показатель рассеяния

$$\mu'_b(\lambda) = -\frac{1}{d} \ln \left(1 - \frac{I_S}{I_M} \right).$$

В обеих формулах $d = 50$ мм – толщина кюветы, однако в первом случае учитывается двукратное прохождение излучения через нее с отражением от зеркала, а во втором случае прохождение света до его рассеяния или поглощения считается однократным. В формуле (*) в качестве опорного распределения $I_{0\lambda}$ использовалось распределение, полученное при пустой кювете ($I_{E\lambda}$) либо при заполнении кюветы дистиллированной водой ($I_{W\lambda}$), как будет сказано далее.

Измерения и расчеты проводились для 5 проб, не считая дистиллированной воды. Усредненные распределения спектральной яркости, полученные при измерении ослабления, показаны на рис. 2, а, а полученные при регистрации рассеяния назад – на рис. 2, б. Отметки у графиков соответствуют следующим местам взятия проб: ИП – Иорданский пруд, ЦП – Цветочный пруд, СП – Сердобольский пруд (все три находятся на территории парка Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова); РК – южный берег р. Карповки вблизи Аптекарского моста; МК – Морской канал (Путиловская набережная на юге Канонерского острова). Распределения, соответствующие дистиллированной воде, обозначены ДВ.

Все кривые на графиках приведены к единому масштабу домножением на отношения длительностей интегрирования $\tau_{\text{инт}1}/\tau_{\text{инт}2}$: так, например, для кривой ДВ на рис. 2, а этот коэффициент составил $100/60 \approx 1.67$. При этом считается, что зарегистрированная яркость пропорциональна времени интегрирования при любом значении последнего.

Интересно отметить, что при заполнении кюветы дистиллированной водой общий уровень сигнала оказывается выше, чем при прохождении света через пустую кювету, как видно из соотношения $\tau_{\text{инт}}$ для этих двух случаев в табл. 1. Для этого имеются две причины. Во-первых, при контакте стенок кюветы с водой уменьшаются отражательные потери на них. Во-вторых, преломление света в чистой воде уменьшает расхождение светового пучка по сравнению с распространением его в воздухе. Подобные эффекты отмечает Ерлов при описании измерителей ослабления направленного светового пучка в морской воде, с той разницей, что в погружном измерителе вода снаружи прибора и воздух внутри него разделяются стеклами иллюминаторов [20].

На рис. 3 показаны распределения натурального показателя ослабления μ' , рассчитанные при использовании в качестве опорного сигнала для пустой кюветы $I_{E\lambda}$ (а) и для кюветы, заполненной дистиллированной водой $I_{W\lambda}$ (б). Поскольку в формуле (*) опорный сигнал находится в числителе, более высокие значения показателей соответствуют меньшей величине выходного сигнала $I_{T\lambda}$. Закра-

шенные области вдоль кривых показывают доверительный интервал (рис. 3, б).

Распределения показателя ослабления на рис. 3, а по своей форме совпадают с известными из литературы графиками показателя поглощения водой a_λ , а для проб ИП, ЦП и МК, кроме того, имеют значения, близкие к определяемым из эмпирических функций [21]. Видно постепенное

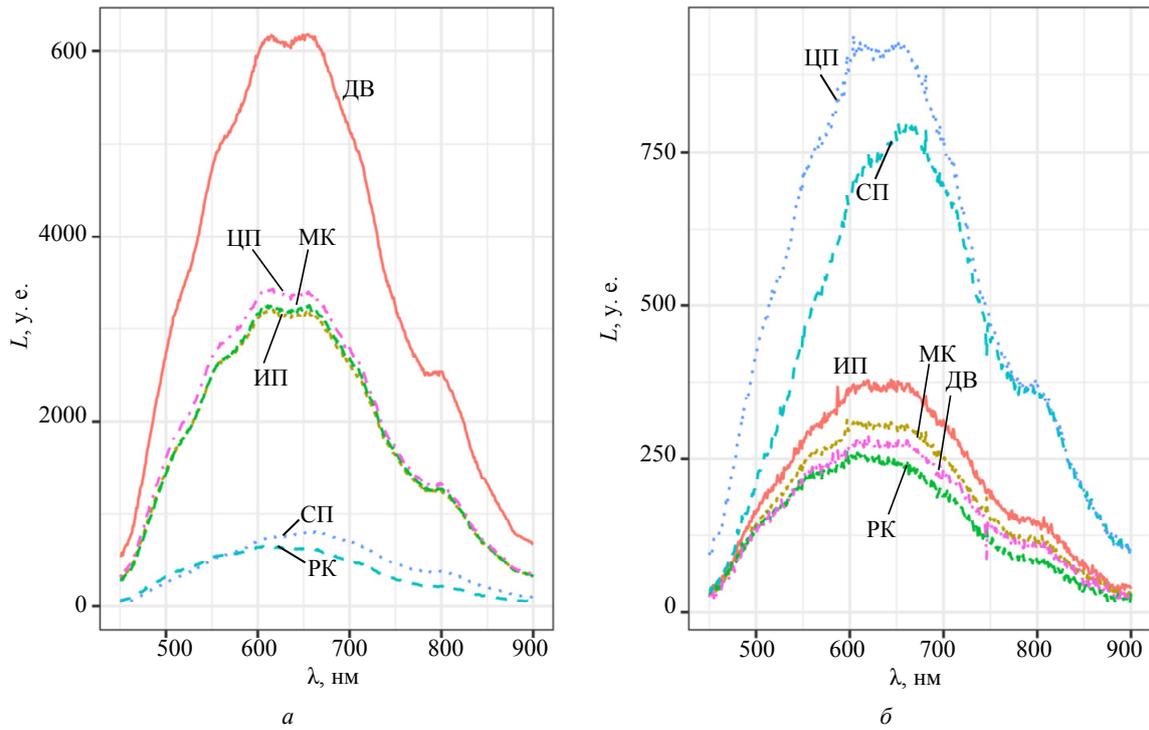


Рис. 2

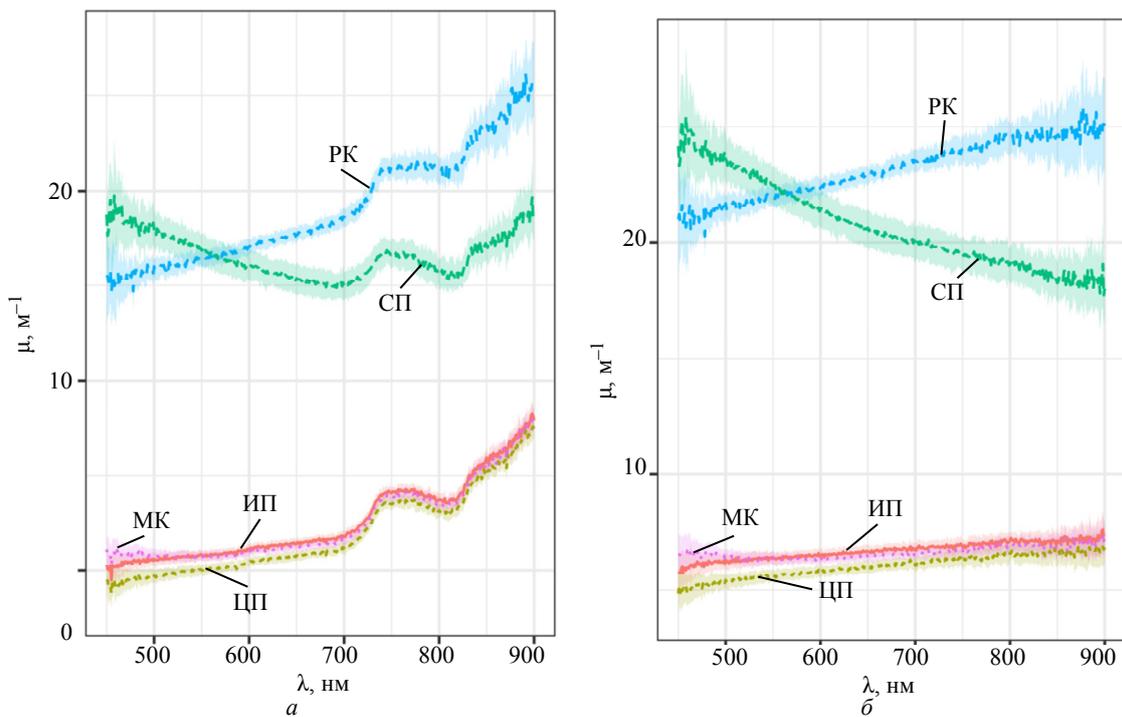


Рис. 3

нарастание ослабления по мере перехода от синезеленой области к красной и характерный излом кривой в области 750...800 нм. Максимум ослабления вблизи 750 нм связан с первым из пиков поглощения в диапазоне длин волн от видимой области и примерно до 10 мкм. Положение этих пиков соответствует энергиям колебательных мод в молекуле воды, связанных с изменением длины связи между атомами кислорода и водорода. При поглощении водяным паром излучение ближнего инфракрасного диапазона возбуждает также вращательные моды, однако в жидкой воде возможность свободного движения молекул ограничена, и происходит гашение этих мод [22].

Кривые на рис. 3, б, рассчитанные с использованием спектра для дистиллированной воды в качестве опорного распределения, отражают вклад в ослабление излучения растворенных и взвешенных компонент природных вод. Поскольку на кривой $I_{W\lambda}$ также присутствует вышеназванный пик поглощения на границе инфракрасной области, то при расчете показателя ослабления кривая μ' в этой области сглаживается. Зависимости для образцов с малым ослаблением приобретают почти линейный вид.

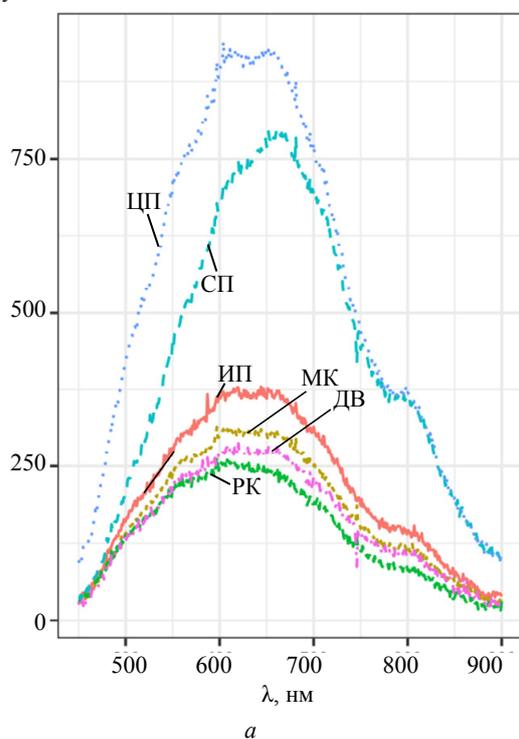
Распределения показателя ослабления μ' разделяются по вертикальной оси графика на две группы: относительно малое ослабление, как уже

было отмечено, наблюдалось в пробах ИП, ЦП и МК, в то время как пробы СП и РК проявляют почти вдвое более высокие значения. Интересно отметить, что такое деление по величине μ' – показателю общей прозрачности вод, не совпадает с делением проб по типу водоема, из которого взята проба (стоячий или проточный). Как в группе с малым показателем ослабления присутствуют пробы из двух прудов и Морского канала, так и высокое ослабление объединяет воды р. Карповки и Сердобольского пруда. Проба СП выделяется также аномально высоким значением ослабления на коротковолновой границе выбранного участка спектра и уменьшением μ' до минимума вблизи 700 нм, вследствие чего распределение на рис. 3, б оказывается убывающим.

Оценить вклад процессов рассеяния в общий показатель ослабления излучения можно по спектральным распределениям показателя рассеяния назад. На рис. 4, а приведены спектры рассеяния для пяти проб природных вод и дистиллированной воды, а на рис. 4, б – рассчитанные по ним зависимости показателя μ'_b . Обозначения проб совпадают с рис. 2, а.

Интересно отметить, что рассеяние излучения дистиллированной водой оказывается не минимальным среди исследованных образцов: на всем своем протяжении, кроме коротковолновой обла-

$L, \text{ у. е.}$



$\mu'_b, \text{ см}^{-1}$

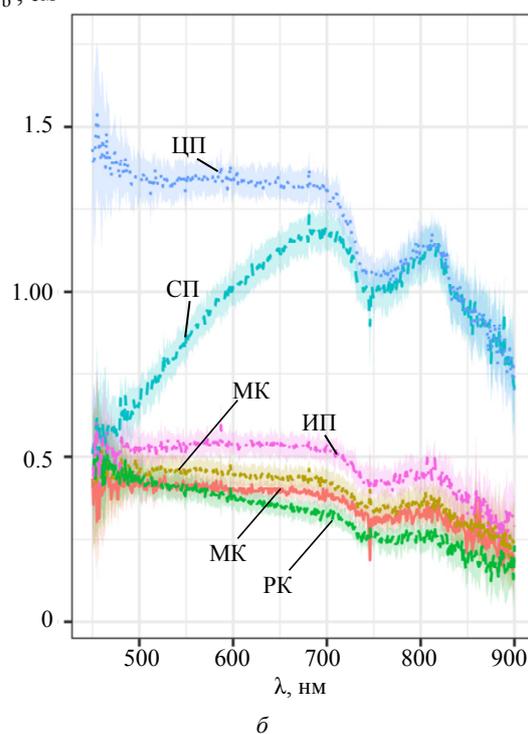


Рис. 4

сти, кривая ДВ оказывается выше кривой РК. Причиной этого, впрочем, служит не слабое рассеяние излучения водами Карповки, а скорее, интенсивное его поглощение растворенными компонентами, на что указывают кривые суммарного ослабления на рис. 3. Выбросы в районе 750 нм, присутствующие на некоторых кривых, обусловлены, вероятно, неточностью регистрации распределения темновых шумов.

Видно, что форма каждого из графиков на рис. 4, б напоминает соответствующую кривую $\mu'(\lambda)$ (рис. 2, а), перевернутую вертикально. Тем не менее, взаимное расположение графиков здесь уже иное: группу с малым рассеянием (низкие значения η'_b) формируют пробы ИП, МК и РК, проба ЦП характеризуется высоким рассеянием назад, а СП занимает промежуточное положение, объединяя высокие значения в инфракрасной области с низкими в видимой.

Качественное сходство распределений показателей рассеяния и поглощения для каждой из проб вызывает вопрос о корреляции этих величин. Количественная оценка степени взаимосвязи была выполнена при помощи непараметрического коэффициента ранговой корреляции Спирмена, который рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)},$$

где d_i^2 – квадрат разности рангов значений μ'_i , η'_{bi} ; n – количество таких пар значений в спектре. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Во всех случаях было получено $p < 2.2 \cdot 10^{-16}$.

Таблица 2

Проба	ρ
ИП	-0.77
ЦП	-0.94
СП	-0.95
РК	-0.98
МК	-0.94
$I_{S\lambda}$	4000

Зависимость показателя рассеяния от показателя ослабления для всех проб представлена графически на рис. 5. Каждая точка соответствует отдельной длине волны; обозначения проб сохраняются прежними. Отрезками прямых показана линейная аппроксимация ($\eta'_b \sim k\mu' + b$), выполненная для каждой пробы.

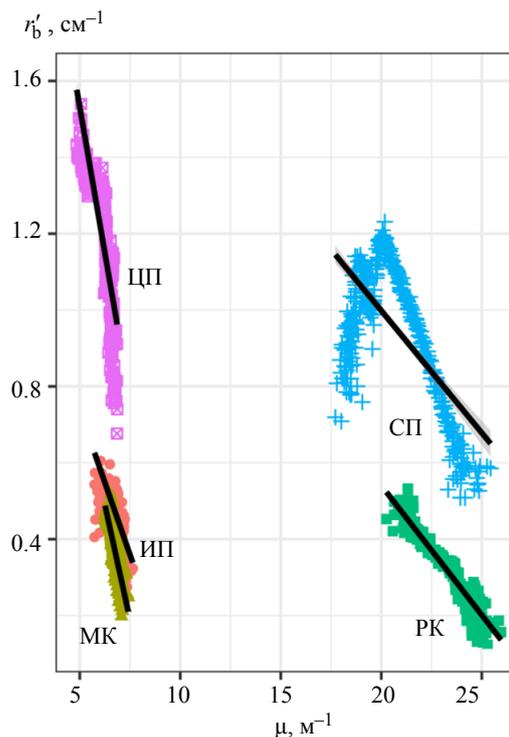


Рис. 5

Значения коэффициента корреляции ρ из табл. 2 и вид графиков рассеяния подтверждают наличие линейной взаимосвязи между показателями ослабления рассеяния назад для всех проб. Выделяются среди прочих две пробы. Во-первых, ИП, у которой низкое значение $\rho = -0.77$ обусловлено наличием точек с большим разбросом η'_b в области малых μ' . Во-вторых, СП, в пределах которой точки сходятся по мере роста рассеяния и ослабления, сохраняя, однако, некоторую симметрию относительно исходного направления, что сохраняет высокое значение коэффициента ρ .

График корреляций на рис. 5 позволяет сгруппировать пробы по качественному соотношению интенсивности рассеяния и общего ослабления. Для пробы РК, например, характерны высокие значения показателя ослабления при малом рассеянии. Обратное соотношение наблюдается для пробы ЦП. Пробы МК и ИП показывают одинаково малые значения обоих показателей. Преобладание тех или иных процессов может объясняться различной концентрацией в пробах растворенных органических веществ, а для минеральной взвеси – различием как ее концентрации, так и фракционного состава. Повторные измерения после фильтрации проб с различными размерами ячеек фильтров позволят уточнить полученные зависимости.

Разработанные в ходе исследования конструкция установки и методика измерений позволяют получать спектральные распределения показателей ослабления и рассеяния оптического излучения пробами природных вод в диапазоне от 450 до 900 нм с разрешением 1 нм. Установка будет применяться для исследования оптических характеристик проб из водоемов Санкт-Петербурга и Ленинградской области для дальнейшего сопоставления лабораторных спектров со спектрами отражения, полученными в полевых условиях. Дальнейшее усовершенствование измерителя будет связано с применением ультрафи-

олетового источника для регистрации спектров флуоресценции.

Для статистической обработки результатов измерений и построения графиков использовался свободный математический программный пакет R [23]–[25].

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам кафедры фотоники: ассистенту И. И. Михайлову за содействие в реализации лабораторной установки, доцентам Г. А. Коноплеву и И. А. Ламкину – за помощь в планировании экспериментов и интерпретации их результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shifrin K. S. Physical optics of ocean water. USA, Park: AIP-Press, 1988.
2. Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water / by red. N. Jerlov, E. Steemann Nielsen // Optical aspects of oceanography. New York, Academic Press: 1974. P. 1–24.
3. Falkowski P. G., Raven J. A. Aquatic photosynthesis. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2007.
4. Optical discrimination of a phytoplankton species in natural mixed populations / G. J. Kirkpatrick, D. F. Millie, M. A. Moline, O. Schofield // Limnology and Oceanography. 2000. № 45 (2). P. 467–471.
5. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations / A. Bricaud, H. Claustre, J. Ras, K. Oubelkheir // J. of Geophysical Research [Oceans]. 2004.
6. Babin M., Roesler C. S., Cullen J. J. (editors) Phytoplankton fluorescence: Theory, current literature and in situ measurement // Real-time coastal observing systems for ecosystem dynamics and harmful algal blooms. Paris, France: UNESCO Publishing, 2008. P. 237–280.
7. Jerlov N. G. Optical oceanography. New York: American Elsevier publishing company, 1968.
8. Burt W. V. A light-scattering diagram // J. of Marine Research. 1956. 15. P. 76–80.
9. Kullenberg G. Scattering of light by Sargasso sea water // Deep-Sea Research. 1968. Vol. 15. P. 423–432.
10. Jerlov N. G., Fukuda M. Radiance distribution in the upper layers of the sea // Tellus. 1960. Vol. 12. P. 348–355.
11. Preisendorfer R. W. Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea // Intern. Union of Geodesy and Geophysics Monograph. 1961. Vol. 10. P. 11–30.
12. Pettersson H., Landberg S. Measurements of submarine daylight // Nature. 1934. Vol. 133.
13. Козлянинов М. В. Гидрооптические характеристики и методика их определения // Тр. ИО РАН СССР. 1960. Т. 40. С. 167–174.
14. Ocean Optics, Inc. Red Tide USB650 fiber optics spectrometer installation and operation manual. 2009. URL: <https://www.oceaninsight.com/globalassets/catalog-blocks-and-images/manuals--instruction-old-logo/spectrometer/usb-650-red-tide-installation-and-operation-instructions.pdf> (дата обращения 11.01.21).
15. Burt W. V. Selective transmission of light in tropical Pacific waters // Deep-Sea Research. 1958. Vol. 5. P. 51–61.
16. Knestrick G. L., Curcio J. A., Rockman A. G. Comparison of underwater attenuation of laser with nonlaser light. Washington: U. S. Naval Research Laboratory, 1965.
17. Timofeeva V. A. Instrument for determining the attenuation coefficient of directed light in the sea // Soviet Oceanography. 1960. Vol. 4. P. 177–218.
18. Jerlov N. G. A transparency-meter for ocean water // Tellus. 1957. Vol. 9. P. 229–233.
19. Cooper L. H. N. Comparison between three methods of measuring underwater illumination in coastal waters // J. of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1961. Vol. 41. P. 535–550.
20. Ерлов Н. Г. Ослабление направленного пучка // Оптика моря / пер. с англ. В. Б. Кузнецова, Ю. Е. Очаковского; под ред. Г. Г. Неуймина, Ю. Е. Очаковского. Л.: Гидрометеиздат, 1980. Гл. 3. С. 60–81.
21. Roetters R., McKee D., Utschig C. Temperature and salinity correction coefficients for light absorption by water in the visible to infrared spectral region // Optics Express. 2014. 22 (21). P. 25093–25108.
22. Boss E. Water. Ocean optics web book. 2020. URL: <https://oceanopticsbook.info/view/optical-constituents-of-the-ocean/water> (дата обращения 15.01.21).
23. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения 19.01.21).
24. Wickham H. Reshaping data with the reshape package // J. of Statistical Software. 2007. № 21 (12). P. 1–20.
25. Wickham H. Ggplot2: Elegant graphics for data analysis. New York: Springer-Verlag, 2016.

V. S. Goryainov, M. Khasenova, K. G. Antonenko, A. A. Buznikov
Saint Petersburg Electrotechnical University

A LABORATORY SETUP FOR MEASURING HYDRO-OPTICAL PROPERTIES USING A FIBER OPTICS SPECTROMETER

Many of the components of natural waters participating in ecologically significant processes are optically active, as a result of which the optical characteristics of water bodies are associated with their ecological state and biological productivity. The study of the processes of absorption and scattering of radiation by natural waters is of great importance, including it being a basis for optical methods for remote sensing of the World Ocean from aerospace platforms. The widespread introduction of sensitive multi-element receivers based on charge-coupled devices has led to the appearance of compact and high-speed spectrometers; however, a single passage of radiation through a cell is often insufficient to isolate the characteristic features of natural water samples. In the laboratory setup developed by the authors of this paper for measuring the characteristics of attenuation and scattering of radiation by water samples, the reflection of a light beam from a vertical mirror is used to double the length of the optical path. Attenuation and scattering spectra in the range 450–900 nm with a resolution of 1 nm were obtained using a fiber-optic spectrometer. Correlations between the scattering and attenuation coefficient have been established. The features that allow distinguishing and grouping the considered natural water bodies are highlighted.

Natural waters, inherent hydro-optical properties, light attenuation, light scattering, fiber optics spectrometers

УДК 533.59

А. Н. Соколов, М. З. Щедринский, К. В. Рыбас, В. М. Бебяков,
А. И. Колдыба, В. А. Синькова, К. Н. Сухарев
Филиал АО «Корпорация „Комета“» – «НПЦ ОЭН»

Л. Н. Розанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Многофункциональный высоковакуумный агрегат для криовакуумных систем космического применения

При наземных испытаниях криовакуумных систем бортовой аппаратуры возникает необходимость в длительных испытаниях в составе космического аппарата. В статье представлена конструкция многофункционального высоковакуумного агрегата, включающего в себя турбомолекулярный, криоадсорбционный и магниторазрядный высоковакуумные насосы, разработанного для применения при наземных испытаниях бортовой аппаратуры космического применения. В статье приведены основные технические характеристики составных частей многофункционального высоковакуумного агрегата, вакуумная и электрическая схемы. Приводятся требования к высоковакуумным агрегатам, используемым при наземных испытаниях бортовой аппаратуры космического применения, необходимые для обеспечения непрерывного цикла испытаний космического аппарата. Представлены результаты испытаний, кривая откачки и график спектра масс газов многофункционального высоковакуумного агрегата. Приведены преимущества применения многофункционального высоковакуумного агрегата по сравнению с откачными агрегатами на базе только турбомолекулярного и форвакуумного насосов.

Высоковакуумный агрегат, безмасляный вакуум, масс-спектрометр, наземные испытания, криовакуумная система

В бортовой аппаратуре космических аппаратов дистанционного зондирования Земли широко применяются криовакуумные системы, предназначен-

ные для обеспечения заданных температур фотоприемных устройств. Фотоприемные устройства размещаются внутри криовакуумных систем. Ос-