

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.463.5

EDN: SZCKWQ

## Новый способ определения спектрального поглощения света в море

М. Е. Ли ✉, Е. Б. Шибанов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ michael.lee.mhi@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.2023; одобрена после рецензирования 26.12.2023;  
принята к публикации 18.01.2024.

### Аннотация

**Цель.** Представить и провести анализ нового способа определения поглощения света в море, при помощи которого впервые удалось перенаправить к фотоприемнику практически все рассеянные лучи от исследуемого светового пучка по пути его распространения в слабо поглощающей среде; показать, что столь эффективный сбор рассеянных лучей новым способом позволит не только избежать значительных ошибок от сильного влияния рассеяния на результаты определения поглощения света, но и отказаться от необходимости проводить коррекцию данных путем теоретического моделирования – цель настоящей работы.

**Методы и результаты.** Отмечено, что морская вода является слабо поглощающей светорассеивающей средой, в которой распространение света сопровождается во много раз более сильным его ослаблением от рассеяния, чем от поглощения. Следовательно, при определении поглощения света морской водой на приемном устройстве необходимо собрать не только тот свет, который прошел определенное расстояние в среде после поглощения, но и весь рассеянный на этом пути свет. Ранее был предложен метод измерения поглощения света в зеркальной цилиндрической кювете с источником света на входе и коллектором с фотоприемным устройством на выходе (*reflective-tube absorption meter*), а несколько позднее – аналогичный метод, в котором было использовано явление полного внутреннего отражения. В связи с недостаточно полным сбором рассеянных лучей в этих методах приходится прибегать к коррекции данных путем теоретического моделирования. Предлагается новый способ определения спектрального поглощения света в конической кювете из кварцевого стекла с внешним зеркальным конусом. Показано, что конусная кювета позволяет собрать преобладающую часть рассеянных лучей в проходящем через водную среду пучке путем более эффективного перенаправления этих лучей от места рассеяния света до приемника. Остальная, вышедшая из кюветы часть рассеянных лучей достигает приемника в воздушном пространстве между кюветой и конусным зеркалом за счет многократного отражения от него. В результате новым способом удастся перенаправить к приемнику практически весь рассеянный свет и таким образом минимизировать ошибки определения поглощения света в слабо поглощающей среде. Для количественной оценки преимуществ нового способа были проведены расчеты геометрических параметров распространения рассеянного света для конусной кварцевой кюветы на воздухе и для той же кюветы, помещенной внутрь внешнего конусного зеркала.

**Выводы.** Сочетание конусной кварцевой кюветы и внешнего зеркального конуса в новом способе позволило собрать в приемнике все рассеянные в слабо поглощающей среде лучи и тем самым не только исключить их сильное влияние на определение поглощения света в море, но и отказаться от необходимости проводить коррекцию данных путем теоретического моделирования.

© Ли М. Е., Шибанов Е. Б., 2024

**Ключевые слова:** поглощение света, рассеивающая среда, полное внутреннее отражение, конусная кварцевая кювета, конусное зеркало, угол рассеяния, ход лучей

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания FNNN-2024-0012.

**Для цитирования:** Ли М. Е., Шибанов Е. Б. Новый способ определения спектрального поглощения света в море // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 198–214. EDN SZCKWQ.

Original article

## New Method for Determining Spectral Absorption of Light in the Sea

M. E. Lee , E. B. Shybanov

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

 *michael.lee.mhi@gmail.com*

### Abstract

**Purpose.** The study is purposed at presenting and analyzing a new method for determining light absorption in the sea which for the first time made it possible to redirect almost all the scattered rays from the studied light beam to the photodetector along the path of its propagation in a weakly absorbing medium, as well as at showing that application of the new method providing such an efficient collecting of the scattered rays, permits not only to avoid significant errors from the strong influence of scattering upon the results of determining the light absorption, but also to give up the necessity in correcting the data by theoretical modeling.

**Methods and Results.** It is known that sea water is a weakly absorbing light-scattering medium in which the light propagation is accompanied by its attenuation that is many times stronger due to scattering than due to absorption. Therefore, the determination of light absorption by seawater at a receiving device requires collecting of not only the light that has traveled a certain distance in the absorption medium, but also all the light scattered along this path. Previously, proposed was the method for measuring the light absorption in a cylindrical mirror cuvette with a light source at the input and a collector with a photodetector at the output (*reflective-tube absorption meter*). Somewhat later, a similar method based on the phenomenon of total internal reflection was applied. Since these methods do not provide the sufficiently complete collection of scattered rays, the data are to be corrected by theoretical modeling. The authors propose a new method for determining the spectral absorption of light in a quartz glass conical cuvette with an external mirror cone. It is shown that the cone cuvette permits to collect most of the scattered rays in the beam passing through the water medium by means of more efficient redirection of these rays from the place of light scattering to the receiver. The rest part of the scattered rays that has left the cuvette reaches the receiver in the air space between the cuvette and the cone mirror due to multiple reflections from it. As a result, the new method makes it possible to redirect almost all of the scattered light to the receiver and thus to minimize the errors in determining the light absorption in a weakly absorbing medium. To quantify the advantages of the new method, the authors have calculated the geometric parameters of the scattered light propagation for a conical quartz cuvette in air and for the same cuvette placed inside the external cone mirror.

**Conclusions.** The combination of a conical quartz cuvette and an external mirror cone in the new method made it possible to collect all the rays scattered in a weakly absorbing medium in the receiver. Thus, it permitted not only to exclude their strong influence upon the determination of light absorption in the sea, but also to give up the necessity in correcting the data by theoretical modeling.

**Keywords:** light absorption, scattering medium, total internal reflection, cone quartz cell, cone mirror, scattering angle, ray path

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of state assignment FNNN-2024-0012.

## **Введение**

Поглощение морской воды – одна из важнейших гидрооптических характеристик, определяющих распространение светового излучения в море. Спектр показателя поглощения содержит информацию о присутствующих в морской воде минеральной и органической взвеси, клетках фитопланктона и растворенного органического вещества. Поглощение и рассеяние света этими примесями формируют подводное световое поле открытых акваторий большинства морей и океанов и, таким образом, влияют на спектр проникающего в глубину и восходящего из моря солнечного излучения. Такие спектральные изменения дают информацию о цвете океана, по которому с помощью космических сканеров цвета можно проводить систематический мониторинг глобальных пространственно-временных изменений в поверхностном жизнедеятельном слое по всему Мировому океану [1]. Во всех моделях переноса светового излучения морской среды первичные оптические свойства, к которым относятся поглощение и рассеяние, являются либо необходимыми входными параметрами, либо, в случае обратных задач, выходными данными расчетов. В связи с этим измерения величины поглощения имеют большое прикладное значение, особенно для задач верификации спутниковых сканеров цвета моря, тесно связанных с экологическим мониторингом его состояния.

Применяемые в настоящее время натурные методы определения спектрального показателя поглощения света не позволяют получать достоверные данные в связи с недостаточной точностью измерений. Например, в синей области спектра, где находятся основные полосы поглощения пигментов фитопланктона и растворенных органических веществ, величина поглощения света морских вод высокой прозрачности столь незначительна, что с трудом может быть зарегистрирована современными фотометрами.

Еще более значительная сложность в измерении показателя поглощения света в море связана с тем, что морская вода является слабо поглощающей светорассеивающей средой, в которой распространение света сопровождается во много раз более сильным его ослаблением от рассеяния, чем от поглощения. Следовательно, при измерениях показателя поглощения света морской водой на приемном устройстве необходимо собрать не только тот свет, который прошел определенное расстояние в среде после поглощения, но и весь рассеянный на этом пути свет. Эта особенность приводит к взаимно противоречивым требованиям при разработке методов измерений поглощения света в море. С одной стороны, для обеспечения чувствительности метода необходимо измерять ослабленный вследствие поглощения свет на как можно большем пути его прохождения в среде, большей длине измерительной базы. С другой стороны, большая длина базы делает очень трудной задачу перенаправления всего рассеянного на этом пути света в сторону коллектора для сбора на светоприемном устройстве.

Для относительно прозрачной морской воды трудности сбора рассеянных лучей возрастают многократно в связи с тем, что в море рассеяние преобладает над поглощением. По этой причине существующие методы определения по-

глощения света не позволяют получать достоверные данные, пригодные для использования в моделировании и в задачах по восстановлению примесей по цвету моря. Исходя из диапазона изменчивости коэффициента яркости моря в спектральном интервале, где поглощением чистой воды можно пренебречь, а также пользуясь информацией о характерных значениях параметра асимметрии индикатрис рассеяния [2], можно оценить, что соотношение между ослаблением света от рассеяния и его ослаблением от поглощения может достигать значений 20 и выше при интенсивном цветении кокколитофорид.

Следует иметь в виду, что в данном случае речь идет именно об относительно чистых водах, а не о специально приготовленных в лаборатории идеально чистых (*pure water*) или особо чистых океанских, для которых прямые методы определения поглощения света не применимы вследствие того, что невозможно собрать на приемном устройстве весь рассеянный свет с измерительных баз длиной до десятка метров. Определение спектрального поглощения света для таких идеально чистых вод возможно лишь косвенными способами, такими как метод, основанный на использовании характеристик естественного подводного светового поля в наиболее чистых водах отдельных акваторий Мирового океана [3, 4].

Для определения спектральных характеристик поглощения чистых вод предложен метод *integrating cavity absorption meter (ICAM)* [5], использующий две интегрирующие полости, находящиеся одна внутри другой: внутреннюю, заполняемую водой, и внешнюю, создающую изотропное освещение во внутренней полости, не зависящее от каких-либо эффектов рассеяния. Строгое теоретическое обоснование метода *ICAM*, рабочие уравнения учета влияния рассеивающих частиц на определение спектрального поглощения особо чистой воды и способы абсолютной калибровки рассмотрены в работе [6]. За счет изотропного освещения и очень высокой диффузной отражательной способности интегрирующих полостей *ICAM* позволяет измерять очень малые показатели оптического поглощения, практически не зависящие от эффектов рассеяния в образце.

Для определения спектрального поглощения света в очень мутной морской воде был предложен метод [7], в котором исследуемая суспензия культур водорослей для учета рассеяния на клетках помещалась не внутри интегрирующей сферы, а вне ее на разных расстояниях от входа. Применение этого метода оправдано только в редких экологических ситуациях, когда в отдельных акваториях реализуются условия бурного роста микроводорослей и в морской воде наблюдаются чрезвычайно высокие концентрации фитопланктона. Показано, что по данным измерений ослабления света на разных расстояниях от интегрирующей сферы определяются истинные спектры поглощения, практически не зависящие от влияния рассеяния.

Определения спектров поглощения света в условиях морских экспедиций можно проводить в судовой лаборатории портативным спектрофотометром с интегрирующей сферой, заполняемой морской водой [8]. В этом спектрофотометре отобранная в исследуемых акваториях с разных горизонтов морская вода без предварительной подготовки заливается в сферическую кварцевую колбу, обложенную по всей внешней поверхности диффузно отражающим материалом – флуорилоном (*Fluorilon 99-W™*). В этом методе запол-

ненная морской водой интегрирующая сфера не может обеспечить сферическую симметрию в связи с освещением коллимированным пучком и наличием зеркальной компоненты отражения, связанной с кварцевой оболочкой. Тем не менее тщательный анализ, проведенный в работе [9], показал, что при соответствующей градуировке спектрофотометра по эталонному водному раствору можно получать вполне удовлетворительные данные по спектрам поглощения света морских вод.

### **Метод определения поглощения света в цилиндрической отражающей кювете**

В настоящее время в гидрооптике получил широкое распространение прибор, работа которого основана на использовании зеркальной цилиндрической кюветы (*reflective-tube absorption meter*) [10, 11]. При идеальном зеркальном отражении такая кювета могла бы перенаправлять весь рассеянный в переднюю полусферу свет к приемному коллектору и тем самым обеспечивать качественное определение его поглощения в море. В действительности же, чтобы исключить непосредственный контакт с агрессивной морской водой, использовалось зеркальное покрытие на внешней стенке тонкой стеклянной трубы с коэффициентом отражения  $< 95\%$ . Этого было недостаточно для достижения минимально допустимой ошибки в определении поглощения света в слабо поглощающих водных средах. Вследствие невысокого коэффициента зеркального отражения такой цилиндрической кюветы рассеянные в сторону стенок лучи терялись из-за потерь при многократных отражениях. В результате до коллектора доходила лишь часть рассеянного вперед света, причем с удлиненным путем его прохождения в среде. Влияние этих не дошедших до приемного устройства рассеянных лучей приходилось учитывать путем теоретического моделирования с последующей коррекцией значений [12]. Для мутных озерных вод такая коррекция позволяла получать данные с приемлемой погрешностью, но для морских вод получались значения только оценочного характера.

В 90-х годах прошлого столетия была предложена схема измерений с цилиндрической кюветой из кварцевого стекла без зеркального покрытия. Для перенаправления рассеянных внутри кюветы лучей к коллектору использовалось явление полного внутреннего отражения от поверхности раздела кварц – воздух [13, 14]. Идеально гладкая, хорошо полированная цилиндрическая поверхность кварцевой кюветы отражает все фотоны, падающие на нее под углом больше критического угла  $\arcsin(1/n_w) \approx 48,5^\circ$  (где  $n_w$  – показатель преломления морской воды), поскольку фотоны будут испытывать полное внутреннее отражение. Поэтому все фотоны, рассеянные в угловом диапазоне  $0-41,5^\circ$ , без потерь достигнут коллектора приемного устройства или непосредственно не касаясь стенки, или путем нескольких отражений. Вследствие того, что индикатриса рассеяния природных морских вод имеет сильный пик в прямом направлении [15, 16], в этом случае удастся перенаправить большую часть рассеянных вперед лучей и таким образом сохранить их в проходящем через водную среду пучке. Тем не менее при использовании этого ме-

тогда не удастся избежать потери части рассеянных под большими углами лучей, так как они выходят из кюветы в воздух и не доходят до приемного коллектора. Выбывание из основного пучка света этих рассеянных лучей является основным источником ошибок в методе определения поглощения света в цилиндрической кварцевой кювете [11]. Таким образом, к недостаткам этого метода, получившего широкое применение в коммерческих приборах [17], можно отнести потерю рассеянных лучей под углами в диапазоне  $41,5-90^\circ$ .

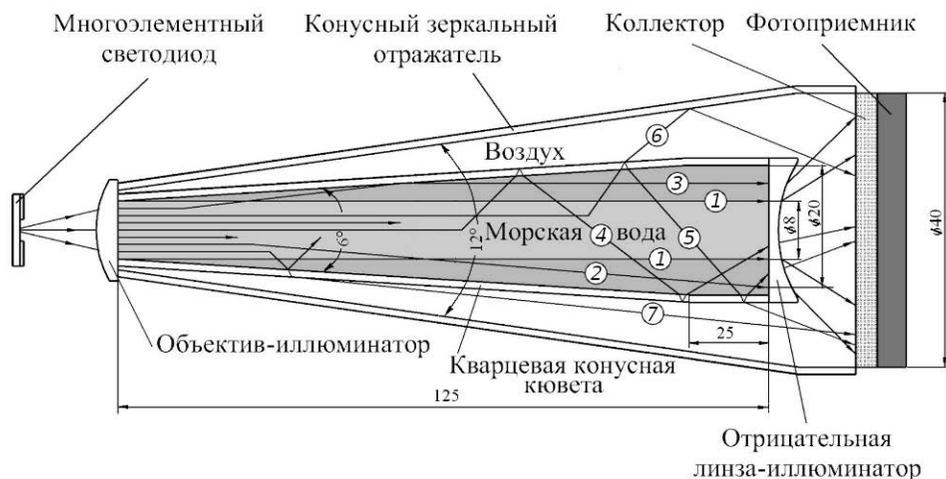
Еще одним недостатком анализируемого метода является удлинение пути рассеянных лучей от источника к коллектору, распространяющихся зигзагообразно внутри кюветы. Из-за этих недостатков, как и при использовании метода, основанного на работе прибора с зеркальной цилиндрической кюветой, приходится прибегать к коррекции получаемых данных путем теоретического моделирования [18, 19]. Результаты показали, что относительная ошибка поглощения всегда положительна и линейно возрастает с увеличением отношения рассеяния к поглощению. Также ошибка увеличивается с уменьшением отражательной способности цилиндрической поверхности кюветы.

#### **Аспекты нового подхода к определению свойств поглощения света в море**

В настоящей работе предлагается минимизировать ошибки путем применения нового способа определения спектрального поглощения света, позволяющего перенаправлять к коллектору практически весь рассеянный в слабо поглощающей водной среде свет. Для достижения наилучшего результата необходимо перенаправлять к приемному коллектору все рассеянные лучи в диапазоне  $0-180^\circ$ . Но с учетом того, что в обратном направлении в морской воде рассеивается лишь  $1-2\%$  фотонов, вполне допустимо ограничиться перехватом лучей, рассеянных в переднюю полусферу в диапазоне  $0-90^\circ$ . Для решения этой задачи мы предлагаем определять поглощение света в **конической кювете** из кварцевого стекла, помещенной соосно внутри внешнего зеркального конуса (рис. 1).

Как видно из рис. 1, вместо обычно применяющейся в настоящее время кюветы цилиндрической формы конусная кювета выполнена из кварцевого стекла в виде тонкостенного конуса, который завершается цилиндрической частью лишь на небольшом отрезке перед приемным коллектором. Такая форма кюветы позволяет больше и эффективнее перенаправлять к коллектору рассеянные в водной среде фотоны, испытывающие полное внутреннее отражение на поверхности раздела кварц – воздух.

Рассеянные под большими углами лучи выходят в воздушное пространство между конусной кюветой и зеркальным конусом. Эти лучи не теряются, как в применяющихся в настоящее время методах, а собираются внешним зеркальным конусом в пучке света, направленного на коллектор. Таким образом, определение поглощения света в конусной кювете, совмещенной с конусным зеркалом, позволяет устранить перечисленные выше недостатки существующих методов, поскольку на приемный коллектор перенаправляются практически все рассеянные в переднюю полусферу лучи.



**Р и с. 1.** Схема нового способа определения поглощения света в морской воде с примерами хода лучей от источника до коллектора. Лучами, заканчивающимися в воде, обозначена поглощенная часть света в пучке: 1 – лучи, прошедшие через всю кювету без ослабления; 2, 3 – рассеянные лучи в малых углах, дошедшие до коллектора не касаясь стенки, а также перенаправленные после отражения от стенки кюветы; 4 – рассеянные лучи, испытавшие полное внутреннее отражение и дошедшие до коллектора путем неоднократных дополнительных отражений от одной части стенки кюветы к противоположной; 5, 6 – рассеянные лучи, частично отраженные стенкой внутрь и вышедшие после преломления в воздушное пространство между кюветой и зеркальным конусом; 7 – рассеянные лучи, вышедшие из кюветы и достигшие коллектора, не касаясь зеркального конусного отражателя

**F i g. 1.** Scheme of a new method to determine light absorption in seawater with the examples of ray paths from a source to a collector. The rays ending in water indicate the absorbed part of light in a beam: 1 – the rays which passed through the whole cuvette without attenuation; 2, 3 – the scattered beams at small angles which reached the collector without touching its wall, and also redirected after their reflection from the cuvette wall; 4 – the scattered beams which experienced total internal reflection and reached the collector by means of the repeated additional reflections from one part of the cuvette wall to the opposite one; 5, 6 – the scattered beams partially reflected inward the cuvette by the wall and exited after refraction into the air space between the cuvette and the mirror cone; 7 – the scattered beams which left the cuvette and reached the collector without touching the mirror cone reflector

Ограничительным геометрическим параметром нового способа является длина измерительной базы, которая не может быть больше 0,1–0,15 м из-за конусных форм кюветы и зеркального отражателя. Основным фактором, ограничивающим длину измерительной базы, является угол конусной кюветы. Заметим, что цилиндрическая кювета является предельным случаем кюветы конусной формы с углом, равным  $0^\circ$ . Поэтому необходимо расчетным путем подбирать оптимальный угол конусной кюветы, удовлетворяющий многим противоречивым факторам, таким как длина измерительной базы, диаметр коллимированного пучка света, диаметр коллектора и т. д. В результате оптимальными геометрическими параметрами для определения поглощения света в море по новому способу были выбраны следующие:

- длина измерительной базы – 0,125 м;
- диаметр коллимированного пучка света – 0,008 м;

- угол конуса кварцевой кюветы –  $6^\circ$ ;
- угол конуса внешнего зеркального отражателя –  $12^\circ$ ;
- диаметр приемного коллектора – 0,04 м.

В качестве источника света может использоваться мощный многоэлементный светодиод с коллиматором, обеспечивающий определения поглощения света в разных участках спектра в диапазоне 390–630 нм. Многоэлементный светодиод имеет важное преимущество перед традиционно применяемыми лампами накаливания вследствие намного более высокой светоотдачи. Сравнительный анализ показывает, что светодиоды по световому потоку в выбранном спектральном интервале в десятки и сотни раз мощнее, чем лампы накаливания. Спектральные интервалы светодиодов сравнительно узкие (10–20 нм), поэтому их излучение допустимо считать квазимонохроматическим. Многоэлементные разноцветные светодиоды позволяют также проводить быстрое электронное сканирование по спектру в отличие от механического переключения набора узкополосных интерференционных светофильтров.

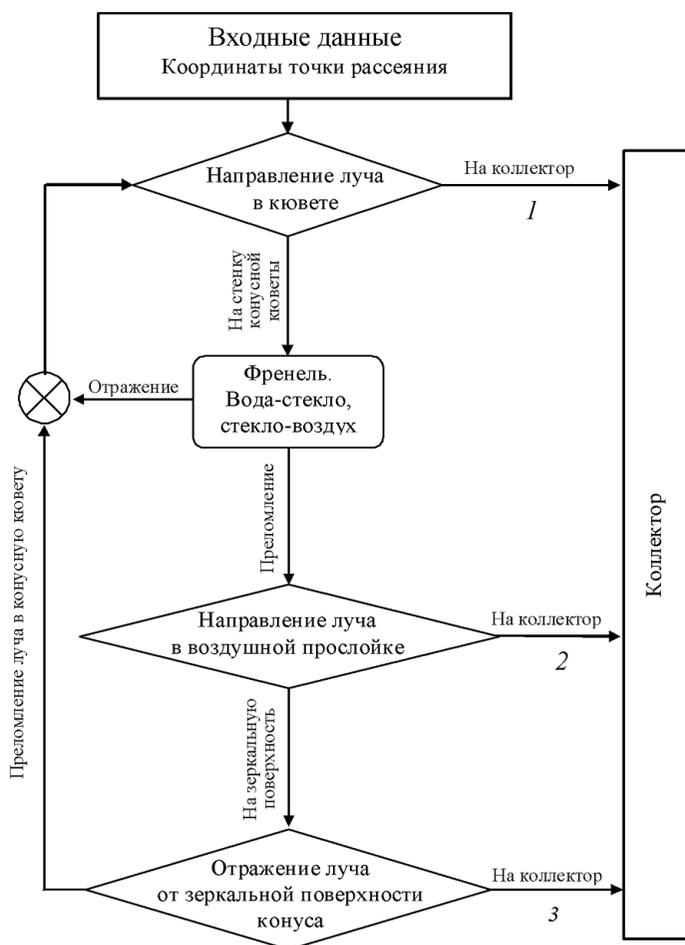
В качестве приемного коллектора чаще всего применяется пластинка из молочного стекла, в которой оптические характеристики и геометрические параметры подобраны так, чтобы обеспечить равномерное перераспределение падающего света по всей его толщине. На приемный коллектор лучи падают с самых разных направлений, неравномерно освещая поверхность, причем их интенсивность значительно различается. Поэтому основная функция коллектора заключается в том, чтобы на выходе формировать равномерное суммарное излучение. В реальности добиться полной равномерности выходящего из коллектора излучения не удастся, поэтому для лучшего согласования необходимо применять приемники светового излучения с большой площадью светочувствительной площадки, сопоставимой с размерами коллектора.

Ход лучей в конусной кювете характеризуется тем, что для прямо прошедшего через водную среду светового потока все происходит так же, как и в цилиндрической кювете. Однако в конической кварцевой кювете значительно больше рассеянных под малыми углами фотонов достигают коллектора без соприкосновения со стенками. За счет этого уменьшается влияние стенки кюветы на определение поглощения света в море, поскольку в природных водах рассеяние происходит в основном в малых углах и практически все они перенаправляются к коллектору без взаимодействия со стенками.

### **Расчеты хода лучей в кварцевой конусной кювете с внешним зеркальным конусом**

В описываемом способе определения поглощения света в море очень важно учесть все многообразие особенностей отражения, преломления и поглощения рассеянных лучей при взаимодействии со стенками кварцевой кюветы и внешним конусным зеркальным отражателем для минимизации ошибок при их влиянии на конечный результат. Для этого были проведены соответствующие расчеты геометрических параметров распространения рассеянного света сначала отдельно для конусной кварцевой кюветы на воздухе, а затем для этой же кюветы, помещенной внутрь внешнего конусного зеркального отражателя.

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма расчета эффективного коэффициента отражения и геометрических параметров хода лучей, рассеянных слабо поглощающей водной средой в кварцевой конусной кювете на воздухе.



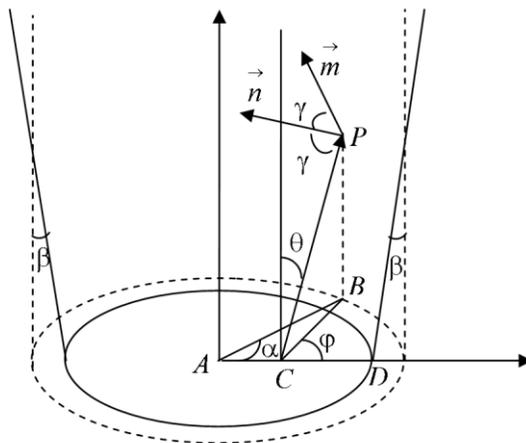
**Р и с. 2.** Блок-схема расчета хода лучей в конусной кювете с зеркальным конусом  
**F i g. 2.** Block diagram for calculating the ray paths in a conical cuvette with a mirror cone

Входными параметрами являются положение исходной точки рассеяния света в среде, а также азимутальный и зенитный угол. Луч может попасть на коллектор тремя способами: 1 – по конусной кювете сразу или после нескольких отражений от стенок; 2 – по воздушной прослойке между конусной кюветой и зеркальным покрытием после преломления на границе раздела стекло – воздух; 3 – по воздушной прослойке после отражения от зеркального покрытия. Таким образом, часть пути луч может проходить по воздуху, уменьшая вероятность его поглощения. Однако это относится к тем лучам, которые рассеиваются под углами  $> 44,5^\circ$ . Для таких углов в стандартной схеме длина пути значительно увеличивается, что вызывает дополнительные вопросы при расчете поглощения.

Во избежание многократного дублирования лучей малой интенсивности считалось, что свет, зеркально отраженный в направлении кварцевой конусной кюветы, проникает в среду с коэффициентом пропускания, равным единице. Относительная ошибка данного упрощения оценивается в 5%. Дальнейший расчет коэффициентов Френеля для таких лучей проводился по упрощенной схеме, а именно: из отраженного и преломленного луча выбирался луч большей интенсивности. Соответствующий коэффициент Френеля приравнялся к единице. Для заданного угла рассеяния проводилось интегрирование по двум пространственным координатам и азимуту. Потери света в данной схеме могут быть связаны только с отражением луча в направлении источника света и с поглощением света при зеркальном отражении от внешнего конусного зеркального отражателя.

Для узкого пучка начальные геометрические условия определяются расстоянием от иллюминатора и углом между осью конуса и направлением рассеяния. При расчете хода лучей широкого пучка необходимо задавать расстояние от оси конуса до точки рассеяния, а также азимутальный угол.

Рассмотрим геометрию отражения внутри кварцевой конусной кюветы. На рис. 3 показана схема распространения рассеянного луча в кювете, имеющей форму конуса с углом раствора, равным  $2\beta$ . Ось конуса направлена вверх. Горизонтальное сечение конуса образует круг с радиусом  $r_1$  и центром в точке  $A$ . Конус заполнен морской водой, освещаемой снизу параллельным пучком. Пусть в точке  $C$  прямой свет рассеивается в некотором направлении, определяемом zenithным углом  $\theta$  и азимутальным углом  $\varphi$ . Рассеянный луч пересекает поверхность конуса на высоте  $z$  в точке  $P$ , в которой происходит отражение луча света обратно в среду. Горизонтальное сечение конуса, проведенное через точку  $P$ , образует окружность с радиусом  $r(z) = r_1 + z \cdot \operatorname{tg}\beta$ , где  $z = |BP|$ . Проекция этой окружности показана штриховой линией на рис. 3.



**Р и с. 3.** Схема распространения рассеянного луча в конусной кювете, используемая для расчета длины пути, количества и углов отражений

**F i g. 3.** Scheme of a scattered beam propagation in a cone cuvette used for calculating a path length, reflection angles and their number

Обозначим через  $x$  расстояние  $|AC|$  от центра конуса. Из уравнений для треугольников  $ABC$  и  $BSP$  определяется длина отрезка  $BC$

$$|BC| = \sqrt{(r_1 + x \cdot \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \theta)^2 - x^2 \sin^2 \varphi} - x \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

и соответствующая ей высота  $z = |BC / \operatorname{tg} \theta|$ . Длина пути луча света  $|CP|$  до точки отражения рассчитывается по теореме Пифагора.

Пересечение луча с конусом возможно, если выполняется неравенство

$$(x \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \theta - r_1 \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 \geq (x^2 - r_1^2)(\operatorname{tg}^2 \theta - \operatorname{tg}^2 \beta). \quad (2)$$

Условие (2) будет проверяться для случаев, если точка  $C$  находится за пределами конуса. Азимут  $\alpha$  относительно центра для точки отражения  $P$  удовлетворяет уравнению

$$\cos \alpha = \frac{|AC|}{r(z)} \cdot \sin^2 \varphi + \cos \varphi \sqrt{1 - \frac{|AC|^2}{r^2(z)} \sin^2 \varphi}. \quad (3)$$

Единичный вектор в направлении рассеяния имеет декартовы координаты

$$\vec{e}_s = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta), \quad (4)$$

а нормаль к поверхности  $\vec{n}$  в точке отражения равна

$$\vec{n} = (-\cos \beta \cos \alpha, -\cos \beta \sin \alpha, \sin \beta). \quad (5)$$

Косинус угла отражения  $\gamma_r$ , вычисляемый через скалярное произведение

$$\cos \gamma_r = -(\vec{e}_s \cdot \vec{n}), \quad (6)$$

используется при определении коэффициентов Френеля. Направление отраженного  $\vec{e}_r$  луча задается выражением

$$\vec{e}_r = \vec{e}_s - 2(\vec{e}_s \cdot \vec{n}) \vec{n} = \vec{e}_s + 2 \cos \gamma_r \cdot \vec{n}. \quad (7)$$

В соответствии с законом Снеллиуса  $m_1 \sin \gamma_s = m_2 \sin \gamma_t$ , направление преломленного  $\vec{e}_t$  луча находится из выражений

$$\vec{e}_t = \frac{m_1}{m_2} \vec{e}_s + \left( \cos \gamma_t - \frac{m_1}{m_2} \cos \gamma_r \right) \vec{n}, \quad (8)$$

где  $m_1$  – показатель преломления исследуемой среды;  $m_2$  – показатель преломления среды за пределами конуса.

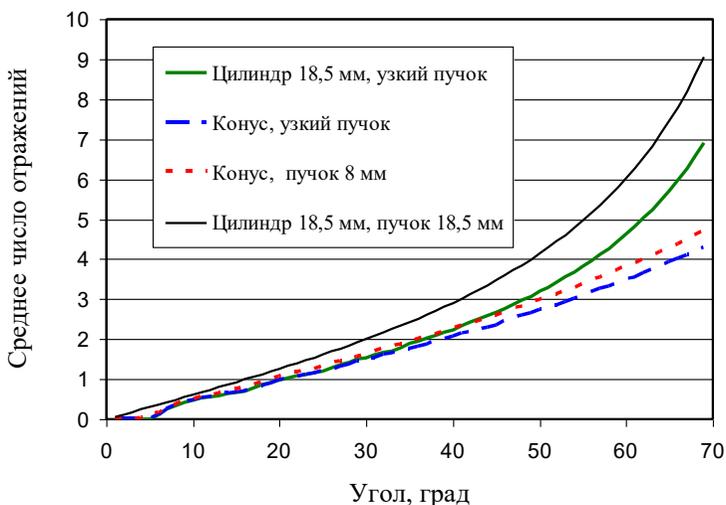
Вектор  $\vec{e}_r$  задает новое направление распространения луча на следующей высоте  $z$ . Итерации проводятся до тех пор, пока луч не выйдет за пре-

лы конуса. При этом для любых углов рассеяния суммируется количество отражений, определяются полная длина пути и потери при отражении. Интегрирование проводится: по азимутальному углу  $\varphi$ , по полному сечению пучка света и по всей длине конуса.

Для демонстрации преимуществ использования конусной кюветы по сравнению с методами измерения поглощения, использующими цилиндрическую кювету [10–14], проведены расчеты по упрощенному алгоритму. В этом случае преломленные лучи не учитываются, а расчеты сводятся к определению точки пересечения луча с границами конуса, а также к вычислению направления отраженного луча (формулы (1) – (7)). Поскольку коэффициент отражения Френеля, начиная с угла полного внутреннего отражения  $\theta_f$ , резко уменьшается, то фактический выигрыш по сохраненной энергии оценивается через интеграл индикатрисы от угла  $90 - \theta_f$  до  $90 - \theta_f + \beta$ . Как показывают расчеты, основное преимущество способа измерения поглощения света с использованием конической кюветы состоит в уменьшении количества отражений и уменьшении вариации длины пути в зависимости от угла рассеяния. Расчеты проведены для следующих параметров: длина конуса  $z_{\max} = 100$  мм, угол раствора  $2\beta = 6^\circ$ , радиус окружности пучка света равен минимальному радиусу конуса  $r_0 = 4$  мм. Наиболее простой случай центрального луча не требует интегрирования по двум переменным. Также проводились расчеты для цилиндрической кюветы (частный случай конуса с нулевым углом раствора) с радиусами 4 и 9,25 мм.

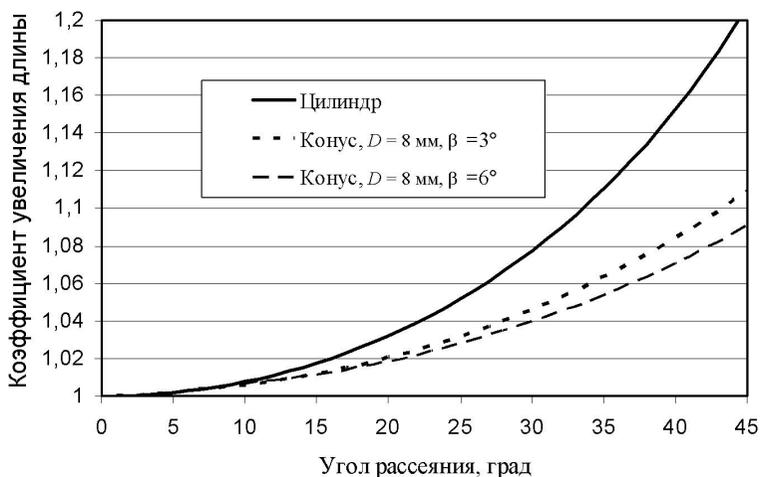
### Результаты и обсуждения

Расчеты хода рассеянных лучей позволили определить, что при распространении их в конусной кювете происходит в два раза меньшее число отражений от стенок кювет, чем в цилиндрической кювете (рис. 4).



**Рис. 4.** Среднее число отражений, испытываемых лучом в зависимости от угла рассеяния  
**Fig. 4.** Average number of reflections experienced by a beam as a function of the scattering angle

Уменьшение числа отражений приводит к тому, что новый способ позволяет ослабить влияние удлинения пути рассеянных лучей на спектральное поглощение света путем спрямления зигзагообразного распространения света в кювете (рис. 5).



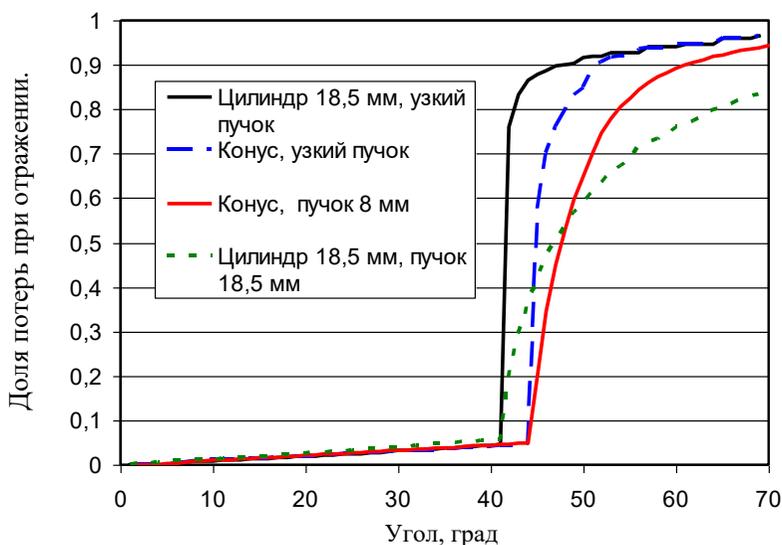
**Р и с. 5.** Коэффициент увеличения длины пути в зависимости от угла рассеяния для кювет в форме цилиндра и конусов с углами  $6^\circ$  и  $12^\circ$

**Fig. 5.** Coefficient of a path length increase depending on the scattering angle for the cuvettes in the form of a cylinder and the cones with the angles  $6^\circ$  and  $12^\circ$

В кварцевой конусной кювете область углов, в которых происходит полное внутреннее отражение рассеянных лучей, становится шире на половину угла конуса, т. е. при  $\beta = 3^\circ$  в диапазоне  $0-44,5^\circ$ . Согласно выполненным оценкам, доля перенаправляемых к приемному коллектору рассеянных лучей увеличится почти на 1% для индикатрис рассеяния, характерных для морской воды.

Если пренебречь процессами отражения, преломления и пропускания света в тонком слое кварца, то можно утверждать, что вблизи приемного коллектора такое перенаправление происходит в основном в результате однократного отражения от стенки кюветы. Лучи, пришедшие на коллектор после двукратного отражения от одной части стенки к противоположной, имеют меньшую интенсивность вследствие сильной анизотропии индикатрисы рассеяния. От входа в кювету к коллектору рассеянные лучи будут распространяться по зигзагообразному пути от одной части стенки к противоположной путем многократного отражения по всей ее длине. Перенаправление рассеянных лучей в результате однократного и двукратного отражений в цилиндрической и конусной кювете происходит примерно одинаково, тогда как для многократных отражений есть существенная разница. В цилиндрической кювете распространение рассеянных лучей в результате многократного отражения происходит по равномерному зигзагообразному пути с одним и тем же шагом. Для больших углов рассеяния зигзагообразный путь становится настолько учащенным, что все лучи, достигшие поверхности раздела цилин-

дрической кюветы и не испытавшие полного внутреннего отражения, в конечном итоге выйдут за пределы кюветы в воздух и окажутся безвозвратно потерянными. В конусной же кювете распространение рассеянных лучей в результате многократных отражений от стенок происходит по расширяющемуся зигзагообразному пути с постепенно увеличивающимся шагом. Соответственно, рассеянные лучи испытывают меньшее число отражений, и поэтому меньше теряется фотонов при взаимодействиях со стенками конической кюветы, как это наглядно видно из данных расчета на рис. 6.



**Рис. 6.** Доля потерь света в различных формах кварцевой кюветы и светового пучка. Расчеты проведены для случая полного внутреннего отражения от границы раздела вода – воздух при условии, что при отражении теряется еще 2% световой энергии

**Fig. 6.** Proportion of light losses in different forms of a quartz cuvette and a light beam. Calculations were carried out for the case of total internal reflection from the water – air interface, provided that another 2% of light energy is lost during reflection

Из рисунка видно, что в приборе с центральным узким пучком доля энергии, вышедшей из измерительной системы, имеет характерный ступенчатый вид. Это объясняется резким уменьшением коэффициента отражения Френеля после прохождения угла полного внутреннего отражения. В приборе с широким пучком появляется сильная зависимость угла отражения от азимута. Так, например, при зенитном и азимутальном углах рассеяния, равных  $90^\circ$ , и при приближении точки рассеяния к поверхности кюветы рассеянный свет будет распространяться в направлении, близком к касательной к поверхности, что приводит к зеркальному отражению света. Поэтому потери света в результате преломления луча на стенках кюветы и выхода за пределы измерительной области увеличиваются более медленно. По-видимому, авторы работы [19] не учитывали азимутальную зависимость угла отражения, о чем свидетельствует сопоставление рис. 6 с результатами расчетов, приведенных в указанной работе.

Таким образом, конусная кювета позволяет собрать на приемном коллекторе больше рассеянных лучей по сравнению с цилиндрической за счет более эффективного перенаправления этих лучей от места рассеяния света в среде до коллектора. При расчетах с использованием индикатрис Петцольда<sup>1</sup> для рассеянных лучей в области углов 0–44,5° эта доля изменяется в пределах 88–95% со средним значением 93%.

Оставшиеся лучи с углами рассеяния в диапазоне 44,5–90° на внешней границе раздела кварц – воздух разделяются на два потока. В соответствии с законом Френеля часть рассеянных лучей выходит в пространство между кюветой и зеркальным конусом, а другая, отразившись от стенки, возвращается обратно в среду. Как было отмечено выше, в применяемых в настоящее время методах (*reflective-tube absorption meter*) эти лучи безвозвратно теряются и их потери приходится учитывать введением коррекции с помощью теоретического моделирования. Хотя суммарная доля этих лучей относительно невелика и составляет 5–12% от общего рассеяния света, их неучет может привести в отдельных случаях к большим ошибкам в определении поглощения света в море. Поэтому важно, чтобы вышедшие из кюветы рассеянные лучи так же, как и лучи, распространяющиеся внутри кюветы, по возможности без потерь достигали коллектора. Рассеянные лучи, вышедшие из водной среды, распространяются в воздушном пространстве между конусной кварцевой кюветой и конусным зеркальным отражателем. Перенаправление этих лучей к коллектору происходит либо за счет того, что свет из кварцевой кюветы в воздух выходит под большим углом, чем в воде, либо в результате многократного отражения его от внешнего зеркального конуса.

### Заключение

При распространении света в море процессы его рассеяния значительно преобладают над поглощением в водах высокой прозрачности в спектральном окне, обеспечивающем максимальное проникновение света в толщу. Это свидетельствует о том, что морская вода является слабо поглощающей светорассеивающей средой, в которой определение поглощения света зависит в основном от того, насколько эффективно на приемном устройстве собирается не только тот свет, который прошел определенное расстояние в среде после поглощения, но и весь рассеянный на этом пути свет. Предложено решение этой задачи путем применения нового способа определения спектрального поглощения света в конической кювете из кварцевого стекла, помещенной соосно внутри внешнего зеркального конуса. Расчетами геометрии хода лучей показано, что конусная кювета позволяет собрать на приемном коллекторе до 90% рассеянных лучей за счет их более эффективного перенаправления от места рассеяния света в среде до коллектора. Еще ~ 8% рассеянных под большими углами лучей удастся собрать на приемном коллекторе за счет перенаправления по воздуху внешним зеркальным конусным отражателем. Сочетание конусной кварцевой кюветы и внешнего зеркального конуса в новом способе позволило собрать в приемнике практически все рассеян-

---

<sup>1</sup> *Petzold T. J.* Volume scattering functions for selected ocean waters : final report. Warminster, Pennsylvania : Naval Air Development Center, 1972. 82 p.

ные в слабо поглощающей среде лучи (тогда как в цилиндрической – только 75–85%) и тем самым не только исключить их сильное влияние на определение поглощения света в море, но и отказаться от необходимости проводить коррекцию данных путем теоретического моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gordon H. R., Morel A. Y.* Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. A review. New York : Springer, 1983. 114 p. (Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies ; vol. 4). <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6280-7>
2. *Левин И. М., Конелевич О. В.* Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 374–379. EDN IAFSKX.
3. *Smith R. C., Baker K. S.* Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, iss. 2. P. 177–184. <https://doi.org/10.1364/AO.20.000177>
4. Hyperspectral absorption coefficient of “pure” seawater in the range of 350–550 nm inverted from remote sensing reflectance / Z. Lee [et al.] // *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, iss. 3. P. 546–558. <https://doi.org/10.1364/AO.54.000546>
5. *Pope R. M., Fry E. S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, iss. 33. P. 8710–8723. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008710>
6. *Fry E. S., Kattavar G. W., Pope R. M.* Integrating cavity absorption meter // *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, iss. 12. P. 2055–2065. <https://doi.org/10.1364/AO.31.002055>
7. *Merzlyak M. N., Naqvi K. R.* On recording the true absorption spectrum and the scattering spectrum of a turbid sample: application to cell suspensions of the cyanobacterium *Anabaena variabilis* // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2000. Vol. 58, iss. 2–3. P. 123–129. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(00\)00114-7](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(00)00114-7)
8. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей, цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы / С. И. Погосян [и др.] // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 6. С. 934–939. EDN KYGBVR.
9. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы / Д. И. Глуховец [и др.] // *Светотехника*. 2017. № 5. С. 39–43. EDN ZWJQAN.
10. *Clarke G. L., James H. R.* Laboratory analysis of the selective absorption of light by sea water // *Journal of the Optical Society of America*. 1939. Vol. 29, iss. 2. P. 43–55. <https://doi.org/10.1364/JOSA.29.000043>
11. *Ronald J., Zaneveld V., Bartz R.* Beam attenuation and absorption meters // *Proceedings SPIE*. SPIE, 1984. Vol. 489 : Ocean Optics VII. P. 318–324. <https://doi.org/10.1117/12.943318>
12. *Zaneveld J. R. V., Kitchen J. C., Moore C. C.* Scattering error correction of reflecting-tube absorption meters // *Proceedings SPIE*. SPIE, 1994. Vol. 2258 : Ocean Optics XII. P. 44–55. <https://doi.org/10.1117/12.190095>
13. *Zaneveld J. R. V., Bartz R., Kitchen J. C.* Reflective-tube absorption meter // *Proceedings SPIE*. SPIE, 1990. Vol. 1302 : Ocean Optics X. P. 124–136. <https://doi.org/10.1117/12.21439>
14. Analysis of in-situ spectral absorption meter data / J. R. V. Zaneveld [et al.] // *Proceedings SPIE*. SPIE, 1992. Vol. 1750 : Ocean Optics XI. P. 187–200. <https://doi.org/10.1117/12.140649>
15. *Jonasz M., Fournier G. R.* Light scattering by particles in water. Theoretical and Experimental Foundations. Amsterdam : Academic Press, 2007. 704 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-388751-1.X5000-5>

16. Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Пространственная изменчивость оптических характеристик вод в южной части Средиземного моря в весенний период (май 1998 года) // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 53–65. EDN AJGHTJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-53-65>
17. WET labs AC-9: field calibration protocol, deployment techniques, data processing, and design improvements / C. C. Moore [et al.] // Proceedings SPIE. SPIE, 1997. Vol. 2963 : Ocean Optics XIII. P. 725–730. <https://doi.org/10.1117/12.266391>
18. Röttgers R., McKee D., Woźniak S. B. Evaluation of scatter corrections for ac-9 absorption measurements in coastal water // Methods in Oceanography. 2013. Vol. 7. P. 21–39. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2013.11.001>
19. Evaluation and improvement of an iterative scattering correction scheme for in situ absorption and attenuation measurements / D. McKee [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2013. Vol. 30, iss. 7. P. 1527–1541. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00150.1>

*Об авторах:*

**Ли Михаил Ен Гон**, главный научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-2292-1877**, **ResearcherID (WOS): R-4344-2018**, **Scopus Author ID: 56142710400**, **SPIN-код: 2479-6915**, [michael.lee.mhi@gmail.com](mailto:michael.lee.mhi@gmail.com)

**Шибанов Евгений Борисович**, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, **ORCID ID: 0000-0001-7943-305X**, **ResearcherID: ABB-9097-2021**, **Scopus Author ID: 6507075380**, **SPIN-код: 9906-9983**, [e-shybanov@mail.ru](mailto:e-shybanov@mail.ru)