

Метод обнаружения плавающего морского мусора по данным зондирования водной толщи импульсным ультрафиолетовым лидаром

Л.Е. Якушкин^{1, *}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 16.12.2024; после доработки 04.07.2025; подписана в печать 07.08.2025)

Разработан критерий обнаружения плавающего на поверхности воды мусора антропогенного происхождения при зондировании водной толщи импульсным ультрафиолетовым лазером с длиной волны зондирующего излучения 355 нм. Критерий применён к данным лидарного зондирования приповерхностного слоя моря в нескольких экспедициях на Чёрном море. Сформулированы условия применимости предлагаемого критерия обнаружения морского мусора. Проведено сравнение результатов, полученных с использованием данного критерия, с данными визуального наблюдения. Показана возможность использования критерия для оценки масштабов загрязнения акваторий Мирового океана.

PACS: 92.90.+x УДК: 556.5

Ключевые слова: лидар, морской мусор, дистанционное зондирование.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2550902](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2550902)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время серьезной проблемой становится загрязнение водных ресурсов, в том числе морей и океанов, мусором антропогенного происхождения. В частности, значительное беспокойство вызывает проблема накопления пластикового мусора, поскольку на протяжении последних 60 лет наблюдается существенное увеличение производства и использования различных пластиковых предметов, упаковочных материалов, флисовой одежды и других изделий. Значительно облегчая повседневную жизнь людей, высокие темпы производства таких предметов в то же время создают угрозу накопления опасных и плохо перерабатываемых материалов в природе [1]. По данным анализа состава мусора в различных районах Мирового океана, пластиковый мусор составляет 68–96% от общего количества морского мусора. Помимо накопления на поверхности воды, пластиковые отходы, металл, стекло и другие виды морского мусора также выносятся на побережья [22]. При этом следует отметить, что даже в некоторых интенсивно исследуемых районах океана, таких, как западная часть Северной Атлантики или северо-восточная часть Тихого океана, масштабы накоплений мусора мало исследованы.

В связи с этим, существует потребность наращивания работ по очистке акваторий от мусора и его утилизации безопасным способом. Для выяснения масштабов ущерба, наносимого мусором, в частности, пластиковыми отходами, требуется увеличение

знаний о его количестве и распределении по поверхности Мирового океана [2]. Кроме того, для определения эффективности устройств и технологий сбора морского мусора необходимы оценки плотности и доступности мусора, находящегося на поверхности водоёмов [5].

Таким образом, проблема загрязнения гидросферы Земли морским мусором весьма обширна и многогранна. Существует необходимость в дальнейшем изучении масштабов и характера загрязнения, а также в разработке методов сбора и утилизации мусора.

В настоящее время для обнаружения морского мусора используются в основном методы ручного подсчета объектов, собранных при тралении акватории [2], данные визуального наблюдения, а также активно развивающиеся в последнее время методы автоматической обработки изображений, полученных различными способами, в том числе с использованием беспилотных летательных и глубоководных аппаратов [7].

Однако имеющиеся методы обнаружения и подсчета морского мусора обладают рядом недостатков. Точная идентификация предметов посредством автоматической обработки изображений весьма затруднительна и требует предварительного получения и анализа большого количества изображений мусора для машинного обучения нейронных сетей, предназначенных для дальнейшего обнаружения и распознавания мусора [10]. Методы визуального наблюдения и траления имеют недостатки, связанные с длительностью измерений при обследовании большой площади моря, с точностью подсчета количества единиц мусора при визуальном наблюдении и с дороговизной исследований. Визуальное наблюдение, кроме того, возможно только

* E-mail: yakushkin@mail.ru

в светлое время суток и при достаточно хорошей погоде.

В связи с этим возникает необходимость разработки метода подсчета мусора, применимого в широком диапазоне погодных условий и времени суток, а также не подверженного влиянию человеческого фактора.

1. МОРСКИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ ЛИДАРЫ

В настоящее время для исследования различных характеристик приповерхностного слоя морей и внутренних водоёмов широко используются морские лидары. Они позволяют определять концентрацию в морской воде хлорофилла «а» и растворённых органических веществ [12], минеральной взвеси [12], присутствие различных видов микроорганизмов, например, кораллов [13], водорослей [14], масляных и нефтяных пятен [15, 16], планктона [17].

Лидарные измерения основаны на получении и анализе сигнала флуоресценции при зондировании водной толщи лидаром. В англоязычной литературе принято обозначение LIF LiDAR (Laser-Induced Fluorescence Light Detection and Ranging). В спектре флуоресценции присутствуют характерные участки, соответствующие флуоресценции окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ), флуоресценции хлорофилла «а», а также пик рамановского (комбинационного) рассеяния воды, который используется для калибровки сигнала (рис. 1).

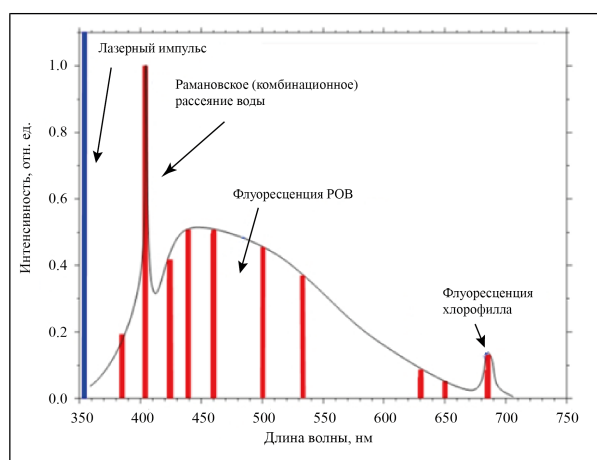


Рис. 1. Схематический вид спектра флуоресценции морской воды

Возвратные сигналы при попадании зондирующего луча ультрафиолетового лидара в воду и в различные загрязнители различаются [18]. В частности, известна методика количественной диагно-

стики нефтяных загрязнений с помощью ультрафиолетового флуоресцентного лидара [21]. Было выдвинуто предположение о том, что возвратный сигнал, принимаемый лидаром при зондировании верхнего слоя моря, можно использовать для определения присутствия на поверхности плавающего мусора антропогенного происхождения.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый метод основан на том, что при попадании лазером в плавающий мусор пик рамановского рассеяния от воды в спектре принимаемого эхо-сигнала должен пропасть, поскольку мусор непрозрачен для зондирующего луча. Благодаря использованию данного метода предполагается возможность эффективного обнаружения мусора на глубине до 1 м, соответствующей характерной глубине лазерного зондирования, в автоматическом режиме независимо от погодных условий и времени суток, а также в более широком диапазоне погодных условий по сравнению с визуальным наблюдением.

Обнаружение мусора с помощью лидара не требует дополнительных затрат судового времени, поскольку для определения концентрации мусора анализируются те же данные, на основе которых определяются вышеперечисленные параметры водоемов. Кроме того, точность метода мало зависит от степени деградации поверхности обнаруживаемого объекта и от его конкретной разновидности.

В ходе полевых работ использовался ультрафиолетовый флуоресцентный лидар УФЛ-9, разработанный в Лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов Института океанологии РАН. В лидаре обрабатывается возвратный сигнал, возникающий в результате возбуждения на двух длинах волн: 355 и 532 нм (вторая и третья гармоники Nd:YAG лазера). Частота зондирования составляет 2 Гц, энергия одного импульса — 2 мДж. Продолжительность одного импульса — 6 нс.

Оптическая система лидара позволяет регистрировать сигнал на длинах волн 355, 385, 404, 424, 440, 460, 499, 532, 620, 651 и 685 нм во время выполнения станций и на четырёх длинах волн 355, 404, 440 и 685 нм одновременно при выполнении разрезов на ходу судна. Возвратный сигнал на длинах волн 355, 440 и 685 нм соответствует флуоресценции взвешенного вещества, цветного растворённого органического вещества и хлорофилла «а» соответственно. Сигнал на длине волны 404 нм соответствует рамановскому (комбинационному) рассеянию воды.

Лидар устанавливался на борту судна под углом примерно 30° относительно вертикальной оси таким образом, чтобы пучок лазерного излучения попадал в поверхность моря. Местоположение лидара выбиралось так, чтобы область формирования эхо-сигнала находилась вне участков, в которых образу-

ется пена в результате обрушения гребней волн, возникающих при движении судна. Это было сделано для того, чтобы снизить шумы, связанные с упругим рассеянием зондирующего сигнала на морской пене. Перед установкой лидара лазер юстировался в зависимости от расстояния между выходным отверстием лазера и поверхностью так, что зондирующий пучок был направлен в ту же точку, что и ось оптической системы регистрации сигнала, вдоль которой распространяется эхо-сигнал. Расстояние от выходного отверстия лазера до поверхности воды было разным в разных экспериментах и составляло приблизительно 2–3 м. Следует отметить, что для данного лидара УФЛ-9 существует техническая возможность юстировки оптической системы для осуществления зондирования на расстоянии до 25 м.

Схема установки лидара показана на рис. 2. В лидаре также имеется система водяного охлаждения лазера, управляющий компьютер с дисплеем и клавиатурой для вывода и ввода параметров зондирования, блок питания, а также выводы для кабелей питания и передачи данных. Оптическая система на входе оснащена объективом, позволяющим фокусировать ее на расстояние между лидаром и поверхностью воды, а также набором фильтров для регистрации сигнала на определенных длинах волн. Лидар позволяет осуществлять регистрацию эхо-сигнала на четырех длинах волн одновременно. Лазер крепится на юстировочных винтах таким образом, чтобы обеспечивать возможность его поворота для направления лазерного зондирующего пучка в нужную область на поверхности воды. При установке лидар соединяется кабелем передачи данных с компьютером, через который осуществляется программирование режимов работы прибора, а также вывод сигналов флуоресценции. Обмен данными во время выполнения разрезов происходит непрерывно.

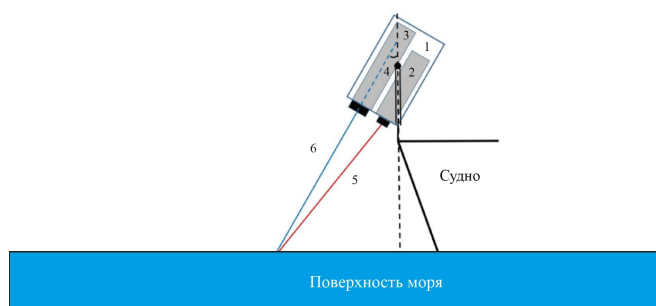


Рис. 2. Схема установки лидара на борту судна: 1 — корпус лидара, 2 — лазер, 3 — оптическая система регистрации сигнала, 4 — угол установки лидара относительно вертикали, 5 — зондирующий пучок лазера, 6 — эхо-сигнал, поступающий в оптическую систему

Предлагаемый метод регистрации плавающих объектов требует разработки формального критерия распознавания плавающего мусора по эхо-сигналу, регистрируемому приемной системой лидара. Был предложен критерий обнаружения мусора по

интенсивности эхо-сигналов на длинах волн 404 нм (рамановское рассеяние) и 440 нм (максимум флуоресценции ОРОВ). Для корректного измерения сигнала рамановского рассеяния необходимо учесть так называемый «пьедестал», на котором он лежит, то есть интенсивность на данной длине волны флуоресценции ОРОВ. «Пьедестал», по натурным данным, собранным в десятках экспедиций в различных районах Мирового океана, составляет 0.11 от сигнала вблизи максимума флуоресценции ОРОВ, 440 нм [19].

Для учета ложных срабатываний критерия при зондировании плавающей травы или листьев, критерий дополнен граничным условием по сигналу на длине волны 685 нм, что соответствует флуоресценции хлорофилла. Также накладывается ограничение на произведение эхо-сигналов на длинах волн 440 и 685 нм, т.е. флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества и хлорофилла, нормированных на сигнал обратного рассеяния на частоте 355 нм. Данное ограничение основано на том, что при попадании зондирующего пучка в мусор сигналы флуоресценции на 440 и 685 нм исчезают практически полностью, а при попадании в морскую пену эти сигналы остаются. Итоговый вариант предлагаемого критерия выглядит так:

$$I_{\text{raman}} = I_{404} - 0.11 \cdot I_{440} \leq 0$$

и

$$I_{404} \times I_{685} \leq 0.02.$$

При зондировании поверхности ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром УФЛ-9 часть единиц мусора не обнаруживается за счёт низкой частоты испускания импульсов (2 Гц), и за это время судно, с борта которого осуществляется зондирование, перемещается на некоторое расстояние.

При скорости движения судна 5 узлов расстояние между двумя попаданиями пучка составляет 1.29 м, а линейный размер поля зрения лидара составляет 0.174 м (при расстоянии до воды 3 м). Отсюда можно определить, что вероятность попадания в плавающий мусор составляет $P = \frac{0.174 \text{ м}}{1.29 \text{ м}} = 0.135$. Поэтому количество мусора на 1 км², полученное на основе лидарных данных, нужно умножить на коэффициент $k = \frac{1}{P^2} \approx 55$. При этом используется предположение о том, что распределение частиц плавающего мусора гомогенно, и для подсчёта количества частиц на единицу площади плотность распределения вдоль трека судна возводится в квадрат.

Метод позволяет обнаруживать объекты, плавающие в приповерхностном слое моря (на глубине до 1 м) с линейными размерами порядка 10 см и больше. Исходя из условий срабатывания критерия, мусором считается всё, что перекрывает зондирующий пучок, препятствуя его попаданию в воду, кроме объектов, флуоресцирующих на длине волн 685 нм. Таким образом, особенность метода состоит

в том, что плавающие объекты, обросшие водорослями и дающие сигнал флуоресценции на 685 нм, могут не быть определены как мусор.

Для обработки данных, собранных в экспедиции 2020 г., была написана компьютерная программа на языке Python, позволяющая рассчитывать плотность плавающего мусора в единицах на квадратный километр.

На входе программа получает координаты, соответствующие треку судна, а также координаты точек, в которых были обнаружены единицы мусора, согласно критерию его обнаружения. Далее строится сетка квадратов заданной площади (например, 1 км²) с центрами на треке движения судна, после чего определяется количество обнаруженного мусора в каждом квадрате.

С помощью данной программы были рассчитаны концентрации мусора по результатам, собранным в экспедиции 2020 г. в Керченском проливе.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Летом 2020 и 2021 гг. в районе Керченского пролива проводились морские прибрежные экспедиции на борту МНИС «Пеленг».

В экспедиции в Черном море в июле 2020 г. был проведен ряд натурных экспериментов с типичными образцами пластикового мусора. Кроме того, в ходе работ в районе Керченского пролива, Таманского п-ва и Феодосийского залива посредством точечных измерений с помощью ультрафиолетового лидара УФЛ-9 были получены спектры флуоресценции верхнего квазиоднородного слоя моря. Общий вид лидара, установленного на борту судна, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид лидара на борту судна

В ходе экспедиции в Геленджике отдельно был проведен эксперимент по лазерному зондированию в полевых условиях 25 образцов мусора, найденных на побережье моря в районе Голубой бухты от мыса, ограничивающего бухту с северо-запада, до 2-й Якорной щели (расстояние составило примерно 1.5 км). Были выбраны образцы, наиболее характерные для антропогенного загрязнения верхнего

слоя моря. Поскольку в формировании эхо-сигнала при зондировании плавающего морского мусора участвует слой морской воды значительной глубины (до 5 м в случае чистой воды), смоделировать подходящие для подобного эксперимента условия в лаборатории представляется затруднительным.

Лидар был установлен на борту судна так, как при выполнении разрезов — под углом 30° к вертикали судно было ошвартовано у причала. Образцы морского мусора подносили под луч лазера с помощью надувной лодки, располагавшейся между судном и причалом (рис. 4). Последовательно осуществлялось зондирование мусора на поверхности моря и на глубине 5, 10 и 20 см.

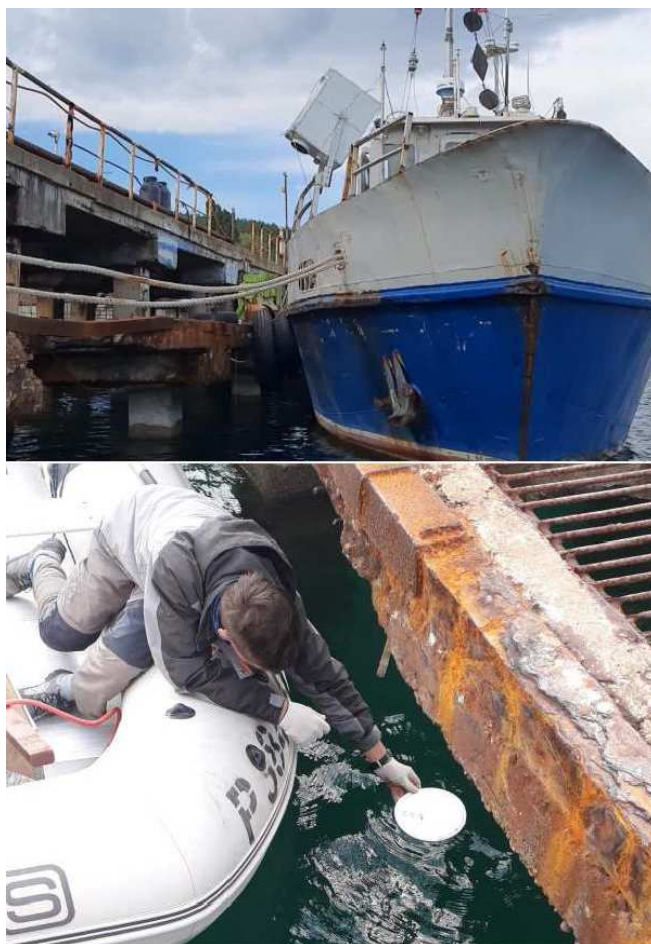


Рис. 4. Модельный натурный эксперимент с различными образцами морского мусора

Для примера на рис. 5 показан один из образцов мусора — одноразовая пластиковая тарелка — и полученный при зондировании спектр флуоресценции водной толщи.

Для сравнения на рис. 5 справа показан фоновый спектр флуоресценции морской воды, снятый в ходе эксперимента. Видно, что при зондировании воды во всех каналах, кроме одного, соответствующего обратному рассеянию на длине волны 355 нм, эхо-сигналы интенсивнее, чем при попадании зондирующего сигнала в пластиковую тарелку.

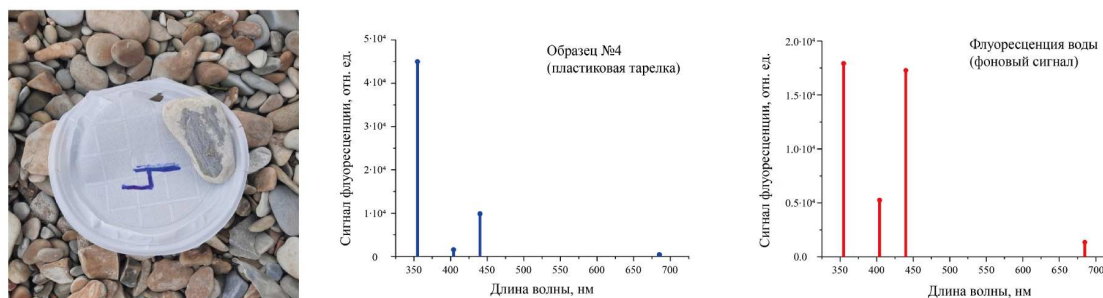


Рис. 5. Один из образцов мусора — пластиковая тарелка; спектр флуоресценции, получившийся при её зондировании; фоновый спектр флуоресценции морской воды

По данным лидарного зондирования с использованием предложенного критерия распознавания мусора была построена карта распределения плавающего мусора в приповерхностном слое моря. Из распределения можно сделать вывод, что мусор, поступающий из Азовского моря, сносится ветром и течением из Керченского пролива в юго-восточном направлении и скапливается возле побережья Таманского полуострова. Результаты, полученные по итогам обработки данных лидарного зондирования, соответствуют результатам визуального подсчета количества единиц плавающего мусора, с учетом замечаний, сделанных выше при описании критерия обнаружения мусора.

К полученным в ходе лидарной съемки данным был применён предложенный критерий обнаружения морского мусора (в первоначальном варианте), после чего была построена карта распределения мусора, показанная на рис. 6.

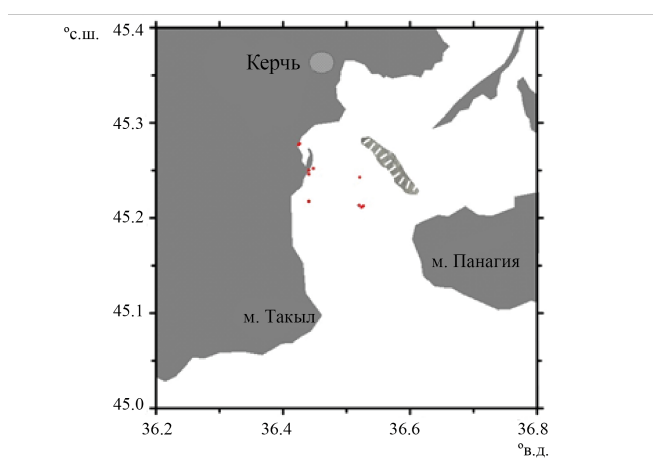


Рис. 6. Карта распределения мусора в Керченском проливе по данным лидарного зондирования в экспедиции 2021 г., построенная в соответствии с первым вариантом критерия обнаружения мусора. Красными точками отмечены места срабатывания критерия

После доработки метода была построена еще одна карта распределения мусора в Керченском проливе с использованием нового критерия. По данным лидарной съемки были также получены данные концентрации взвеси в приповерхностном слое

моря. Обнаружено, что точки срабатывания критерия не совпадают с областями наибольшей концентрации взвеси, что косвенно подтверждает правильность сформулированного критерия.

В ходе экспедиции в сентябре 2021 г. проводились исследования в районе Геленджикской бухты. Исследования проводились с борта МНИС «Ашамба».

Было проведено дистанционное лидарное зондирование верхнего слоя моря на ходу судна с помощью лидара УФЛ-9 для осуществления мониторинга загрязнений. Частота зондирования в квази-прерывном режиме составила 2 Гц, глубина зондирования — примерно 5 м, что соответствует верхнему квазиоднородному слою моря.

На основании данных лидарной съемки построена карта концентрации взвешенного минерального вещества в районе проведения работ (рис. 7), карта распределения концентрации взвешенного органического вещества (на рисунке не показана) и карта распределения морского мусора. Распределение мусора, построенное в соответствии с первым вариантом критерия обнаружения мусора, показано на рис. 7 в наложении на распределение взвешенного органического вещества.

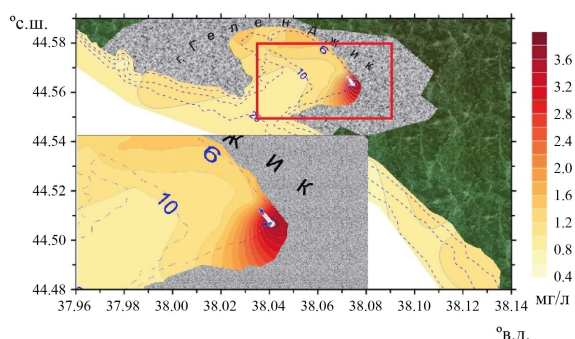


Рис. 7. Карта распределения мусора в соответствии с первым вариантом критерия обнаружения мусора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан критерий обнаружения пластикового мусора на основании данных лидарного зондирования

ния поверхностного слоя моря. Критерий основан на пропадании сигнала комбинационного рассеяния воды при попадании лазерного пучка в плавающий мусор. Кроме того, для учета ложных срабатываний критерия при попадании луча лазера в плавающую траву или листья, критерий дополнен граничным условием по сигналу на длине волны 685 нм, соответствующему флуоресценции хлорофилла.

С учетом вероятности попадания лазерным пучком в плавающий объект, оцениваемое количество единиц мусора на квадратный километр поверхности моря в районе проведения исследований согласуется с данными, приведенными в работе [20], в которой измерялась плотность распределения мусорных частиц в различных районах Атлантики и европейских морей.

Кроме того, было установлено, что в некоторых случаях имеется и обратная проблема — критерий может не срабатывать в том случае, если на поверхности находится прозрачный объект, через который без существенного ослабления распространяется как зондирующий, так и возвратный сигнал, а также для объектов с интенсивной флуоресценцией, когда эхо-сигнал от ОРОВ может быть принят за сигнал рамановского (комбинационного) рассеяния, либо рассчитываемый сигнал рамановского рассеяния оказывается отрицательным, что препятствует обнаружению на поверхности моря объектов, отличных от воды, согласно первоначальному варианту критерия.

Критерий обнаружения мусора был доработан и применен к данным, собранным в экспедиции 2021 г. в Керченском проливе. Результаты построения распределения мусора более точно соответствуют данным визуального наблюдения и подсчета мусора. При этом отсутствует заметное совпадение между областями с высокой концентрацией взвеси и областями с большим количеством мусора, что косвенно подтверждает регистрацию сигнала именно от плавающих объектов, отличных от воды.

Модельный эксперимент с различными образцами пластикового мусора, наиболее характерными для поверхностного слоя моря, подтвердил, что спектр флуоресценции существенно меняется при попадании лазерного пучка в плавающий мусор. В частности, практически во всех случаях пропадает пик рамановского (комбинационного) рассеяния воды, поскольку значительную часть области, зондируемой лидаром, занимает мусор. Это подтверждает гипотезу о возможности использования отношения высоты пика комбинационного рассеяния к высоте пьедестала флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества. Также было обнаружено, что при попадании зондирующего пучка в плавающий мусор эхо-сигнал на длинах волн, соответствующих флуоресценции ОРОВ и хлорофилла практически полностью пропадает, в то время как при попадании пучка в воду интенсивность этих сигналов сравнима с интенсивностью обратного рассеяния.

В ходе экспериментов были установлены следующие условия и ограничения применимости предлагаемого метода обнаружения плавающего мусора.

1. Источник лазерного излучения и оптическая система регистрации сигнала должны быть жестко зафиксированы друг относительно друга для получения стабильного сигнала при изменении угла попадания лазерного луча в воду, а также при изменении дистанции зондирования вследствие судовой качки. Поскольку зондирование в предлагаемом варианте методики осуществляется на ходу, отсутствует возможность усреднения эхо-сигнала для уменьшения дисперсии и уровня шумов.
2. Использование метода представляется затруднительным при высоте волны более 0.5-1 м, поскольку в таких условиях увеличивается дисперсия и зашумленность сигнала в результате качки, а также в результате слишком высокого уровня шумового сигнала при попадании зондирующего сигнала в морскую пену. В результате возрастает количество ложных срабатываний критерия.
3. Разработанный метод на данный момент не позволяет надёжно различать пластиковый и деревянный мусор. Для того, чтобы существовала такая возможность, следует в дальнейшем увеличить число спектральных каналов оптической системы регистрации, что позволит более точно различать спектры флуоресценции органических и неорганических объектов.

Для повышения точности определения количества единиц мусора на единицу площади акватории следует увеличить частоту зондирования верхнего слоя моря лазерными импульсами. Кроме того, можно увеличивать поле обзора лидарной системы таким образом, чтобы повысить площадь акватории, охваченную зондированием, в единицу времени. Таким образом, существует потребность в создании высокочастотных систем лидарного зондирования и систем пространственного сканирования для увеличения площади акватории, охватываемой зондированием.

Обнаружено, что спектры флуоресценции при зондировании морской воды и плавающего мусора характеризуются различным отношением интенсивности эхо-сигнала на длинах волн, соответствующих флуоресценции ОРОВ и хлорофилла, к интенсивности эхо-сигнала обратного рассеяния на частоте зондирующего УФ-излучения. Благодаря этому, становится возможным использование данного отношения сигналов для автоматического обнаружения плавающих объектов, отличных от воды.

Критерий может быть применен к мусору, характерные размеры которого сравнимы с размерами лазерного пучка на поверхности воды (~ 5 мм) или превышают его.

Разработанный метод представляется эффективным и перспективным, в особенности потому, что он автоматизирован и может применяться в широком диапазоне метеоусловий независимо от времени суток. Его эффективность и точность может

быть увеличена за счет повышения частоты следования лазерных импульсов и использования системы сканирования поперек траектории судна.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0015).

- [1] MacLeod M., Arp H.H., Tekman M.B. et al. // *Science*. **373**, 61 (2021).
- [2] Van Seville E., Wilcox C., Lebreton L. et al. // *Environmental Research Letters*. **10**, N 12. 124006 (2015).
- [3] Forrest A., Giacobazzi L., Dunlop S. et al. // *Frontiers in Marine Science*. **6**, 627 (2019).
- [4] Lebreton L., Egger M., Slat B. // *Sci. Rep.* **9**, 12922 (2019).
- [5] Falk-Andersson J., Haarr M.L., Havas V. // *Science of the Total Environment*. **745**, 141117 (2020).
- [6] Koelmans АюА., Kooi M., Law K.L. et al. // *Environmental Research Letters*. **12**, N 11. 114028 (2017).
- [7] Haarr M.L., Falk-Andersson J., Fabres J. // *Science of the Total Environment*. **820**, 153162 (2022).
- [8] Blettler M.C.M., Abrial E., Khan F.R. et al. // *Water Research*. **143**, 416 (2018).
- [9] Canals M., Pham C.K., Bergmann M. et al. // *Environmental Research Letters*. **16**, N 2. 023001 (2021).
- [10] Fulton M., Hong J., Islam M.J. et al. // *arXiv:1804.01079v2* (2019).
- [11] Merlino S., Abbate M., Pietrelli L. et al. // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. **29**, 867 (2018).
- [12] Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V. et al. // *Remote Sensing*. **11**, N 10. 1215 (2019).
- [13] Sasano M., Imasato M., Yamano H. et al. // *Remote Sensing*. **8**, N 1. 48 (2016).
- [14] Rehm E., Dalglish F., Huot M. et al. // *Proceedings of SPIE*. **10631**, 106310Z (2018).
- [15] Li X.-L., Chen Y.-H., Li J. et al. // *Proceedings of SPIE*. **10155**, 101550Q (2016).
- [16] Raimondi V., Palombi L., Lognoli D. et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **61**, 46(2017).
- [17] Liu H., Chen P., Mao Z. et al. // *Optics Express*. **26**, N 22. 29134 (2018).
- [18] Palmer S.C.J., Pelevin V.V., Goncharenko I. et al. // *Remote Sensing*. **5**, № 9. 4405 (2013).
- [19] Pelevin V., Zavialov , Konovalov B. et al. // *Proceedings of 35th EARSel Symposium*. (2015).
- [20] Pham C.K., Ramirez-Llodra E., Alt C.H.S. et al. // *PLoS ONE*. **9**, N 4. e95839 (2014).
- [21] Аброскин А.А., Нольде Е.В., Фадеев В.В. Оптика атмосферы. М.: Наука, 1988.
- [22] Белоусова О., Криницкий М.А., Погоржева М.П. Современные средства и методы мониторинга плавающего морского мусора и внедрение технологий машинного обучения // *Океанологические исследования*. **52**, № 4. 243 (2024).

Method for Detecting Floating Marine Debris Based on Water Column Profiling Data from a Pulsed Ultraviolet Lidar

L.E. Yakushkin

*Department of физики моря и вод суши, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: yakushkin@mail.ru*

A criterion has been developed for detecting anthropogenic debris floating on the water surface during water column profiling using a pulsed ultraviolet laser with a sounding radiation wavelength of 355 nm. The criterion has been applied to lidar sounding data of the near-surface sea layer from several expeditions in the Black Sea. The conditions for the applicability of the proposed marine debris detection criterion are formulated. A comparison has been carried out between the results obtained using this criterion and visual observation data. The potential for using the criterion to assess the scale of pollution in the World Ocean water areas is demonstrated.

PACS: 92.90.+x

Keywords: lidar, marine debris, remote sensing.

Received 16 December 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторе

Якушкин Лев Евгеньевич — аспирант кафедры физики моря и вод суши, инженер Лаборатории оптики океана Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН; e-mail: yakushkin@mail.ru.