

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

Проект автономного микрокатаера с лазерным устройством для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов

В.А. Алексеев¹, С.И. Юран², М.Р. Зарипов³, В.П. Усольцев¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия

³Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 12.05.2023

Принята к печати 19.06.2023

Загрязнение акваторий водоёмов частицами микропластика размером менее 5 мм является серьезной экологической проблемой. Обычно исследования загрязнений водоёмов проводят методом взятия проб воды с дальнейшей их оценкой в лаборатории. Поэтому актуальной является задача исследования акваторий водоёмов на наличие пластика в режиме реального времени с выявлением пятен обширных загрязнений.

В статье рассматривается проект создания автономного беспилотного исследовательского аппарата, работающего в акватории водоёма, с передачей данных исследований в центр обработки информации. Аппарат производит лазерное зондирование водной среды для обнаружения микрочастиц полиэтилена и построения карт пятен загрязнений в исследуемой акватории водоёма.

Для реализации предлагаемого проекта решаются следующие задачи:

- обнаружение микрочастиц пластика в исследуемом объёме водной среды, где размеры частиц на несколько порядков меньше исследуемого объёма;
- идентификация микрочастиц при наличии в исследуемом объёме водной среды частиц других видов веществ;
- оценка количества частиц в условном объёме водной среды.

Предлагается новый подход, заключающийся в создании автономного микрокатаера, который исследует акваторию водоёма по маршруту, задаваемому из центра управления, находящегося на берегу. Исследование предполагает обнаружение микрочастиц в определённом объёме жидкости, протекающей через исследовательскую трубу, установленную в днище катаера. Внутри трубы расположена труба Шаубергера, в центральной части которой концентрируются частицы, что позволяет проводить поиск частиц при зондировании лазерным излучением с длиной волны около 3,5 мкм, на которой пиковое поглощение излучения полиэтиленом многократно превышает поглощение излучения водой.

Для обеспечения энергоэффективности микрокатаера предложено использовать схему сложения импульсов лазерного излучения с использованием оптоволоконной линии оптической задержки. Это позволяет почти на порядок уменьшить энергопотребление лазера. Предлагаемый проект катаера позволит проводить исследования крупных водоёмов с определением пятен загрязнений микрочастицами пластика. В статье приведены примеры используемого оптоволокна, фотоприёмника и лазерного излучателя для решаемой задачи.

Ключевые слова: лазерное зондирование, микрокатаер, микрочастицы пластика

Адрес для переписки:

Юран С.И.
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.
Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, С.И. Юран, М.Р. Зарипов, В.П. Усольцев.
Проект автономного микрокатаера с лазерным устройством
для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 106–114.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

For citation:

V.A. Alekseev, S.I. Yuran, M.R. Zaripov, V.P. Usoltsev.
[The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device
for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 106–114 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic

V.A. Alekseev¹, S.I. Yuran², M.R. Zaripov³, V.P. Usoltsev¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia

³Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 12.05.2023

Accepted for publication 19.06.2023

Abstract

Water area pollution by microplastic particles smaller than 5 mm is a serious environmental problem. Usually, studies of water pollution are carried out by taking water samples with their further analysis in the laboratory. Therefore, study of the water areas for the presence of plastic with the identification of extensive pollution sites in real time is actual.

The project of an autonomous unmanned research vehicle operating in water area and transferring the research data to the information processing center is discussed in the article. The device produces laser probing of the aquatic environment to detect polyethylene microparticles and to build maps of pollution sites in the studied water area.

To implement the proposed project, the following tasks are solved:

- detection of plastic microparticles in the studied volume of the water environment where particle sizes are several orders of magnitude smaller than the studied water volume;
- identification of microparticles in presence of particles of other types of substances in the investigated water environment volume;
- estimation of the number particles' in the studied water environment volume.

A new approach which consists in creating an autonomous microboat that explores the water area along a route set from a control center located on the shore is proposed. The study involves the detection of microparticles in a certain volume of liquid flowing through a research tube installed in the bottom of the boat. There is a Schauburger tube in the central part of which particles are concentrated inside the tube. It makes possible to search for particles by laser probing with a wavelength about 3.5 μm , on which the peak absorption of light by polyethylene many times exceeds the water absorption.

To ensure the energy efficiency of the microboat it is proposed to use a scheme for laser pulses combining using a fiber-optic delay line. This makes it possible to reduce the power consumption of the laser by almost an order of magnitude. The proposed project of the boat will make it possible to conduct studies of large water areas with the detection of plastic microparticles' pollution sites. Examples of the used optical fiber, photodetector and laser source for the problem being solved are derived in the article.

Keywords: laser probing, microboat, plastic microparticles

Адрес для переписки:

Юран С.И.
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.
Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, С.И. Юран, М.Р. Зарипов, В.П. Усольцев.
Проект автономного микрокатаера с лазерным устройством
для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 106–114.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

For citation:

V.A. Alekseev, S.I. Yuran, M.R. Zaripov, V.P. Usoltsev.
[The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device
for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 106–114 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

Введение

Все возрастающая загрязненность водной среды микропластиком представляет потенциальную угрозу для человечества [1, 2]. В связи с этим требуется оперативно выявлять наличие микропластика в водной среде и принимать действенные меры для улучшения экологической обстановки акваторий водоемов.

Для этого необходимо взять пробы водной среды и провести их анализ. Однако еще не сложились единые подходы, методы и методики отбора и анализа проб микропластика в водной среде. Для отбора проб на содержание частиц микропластика различного размера требуются разные типы оборудования и применение различных аналитических лабораторных методов [3]. Отбор полнообъемных проб воды без концентрирования в них пластика применяется редко в связи с малой концентрацией пластика в такой пробе. Наиболее часто применяется концентрирование при отборе проб воды путём уменьшения объёма исходной пробы, а для дальнейшей обработки и анализа сохраняется только небольшая её часть, содержащая микропластик. Это осуществляется за счёт фильтрации больших объёмов воды с помощью, например, планктонных сетей. Они позволяют проводить репрезентативный отбор с большой площади поверхности воды, отбирать частицы микропластика различных размеров. Для отбора проб с поверхностного слоя воды могут использоваться сети, которые буксирует катамаран, движущийся со скоростью 1–5 узлов. Время буксировки может составлять от нескольких минут до нескольких часов, в зависимости от концентрации взвешенного вещества в воде.

Для сбора частиц микропластика нашли применение различного вида пробоотборники [4, 5]. Например, в патенте [6] описан пробоотборник для определения содержания микропластика в морской воде. Он снабжён электрическим погружным насосом, аккумулятором в водонепроницаемом боксе, счётчиком воды, герметичной насадкой со сменными металлическими фильтрами различного размера ячеек. Пробоотборник опускается в воду с борта судна или лодки. После завершения отбора пробы устройство извлекается из воды, производится фиксация показателей счётчика

воды, фильтровальная насадка снимается и переносится в лабораторию для выемки фильтров и дальнейшего анализа.

Для анализа подготовленных проб микропластика, содержащегося в морской среде, в настоящее время используются в основном лабораторные методы [7]. Для идентификации микропластика применяются такие аналитические методики, как спектроскопия комбинационного рассеяния, сканирующая электронная микроскопия и некоторые её разновидности, ИК-Фурье спектроскопия. Наиболее распространена идентификация микропластика с применением ИК-спектроскопии [8]. При использовании данного метода проводится сравнение ИК-спектра поглощения или пропускания образца со спектрами известных синтетических веществ. Для этого применяются различные спектрометрические приборы: инфракрасный спектрометр, ИК-Фурье спектрометр и ИК-спектроскоп для работы в ближней ИК области спектра. В работе [9] для ИК-анализа использовался квантово-каскадный лазер (QCL), работающий в средней инфракрасной области спектра. Достоинством спектроскопии комбинационного рассеяния является отсутствие необходимости в пробоподготовке, возможность проводить измерения непосредственно в воде.

Однако известные приборы и способы обнаружения микрочастиц не позволяют проводить оценку загрязнений микрочастицами в реальном масштабе времени. Более того, в ряде способов оценки мутности предлагается предварительно очистить пробы от отдельных микрочастиц. Обнаружение и идентификация микрочастиц при их достаточно малых концентрациях в жидкости является сложной задачей. Поэтому задача создания подобного класса анализаторов микрочастиц является актуальной для экологического контроля.

Предлагаемые решения для реализации проекта

В данной работе предлагается создание лазерной установки для контроля наличия полиэтилена малого размера в различных крупных водоёмах. Данная лазерная установка будет установлена в беспилотное водное транспортное средство. Как пример, можно рассмотреть беспилотное водное транспортное средство

для экологического мониторинга воды [10]. Данное транспортное средство, используя энергию солнца и ветра, способно автономно работать вплоть до 10 месяцев, передавая и принимая информацию с помощью радио-передатчика.

Предлагаемый проект будет выполнять ряд задач.

1. Определение микрочастиц в большом объеме воды, значительно превышающем размеры частиц, которые находятся в диапазоне 0,5–5 мм.

2. Идентификация микрочастиц полиэтилена в водной среде.

3. Определение частиц в режиме реального времени.

Указанные задачи будут решаться следующим образом. При движении катера по водной поверхности происходит поступление потока воды в измерительную трубу, где происходит скопление микрочастиц в центральной части потока за счёт использования эффекта закручивания потока жидкости в трубе Шаубергера. Далее лазерное излучение с выбранной длиной волны излучения, позволяющего идентифицировать микрочастицы по спектральному поглощению полиэтилена, зондирует центральную часть потока жидкости. Фиксация наличия частиц в исследованном потоке происходит в режиме реального времени [11].

На рисунке 1 представлена конструкция трубы Шаубергера [12] с двухпоточным спиральным течением.

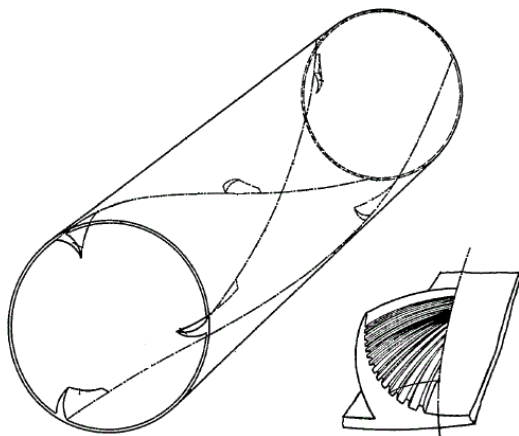


Рисунок 1 – Конструкция трубы Шаубергера с двухпоточным спиральным течением

Figure 1 – Construction of a Schaubberger tube with a two-flow spiral flow

В данной трубе есть специальной формы лопасти, которые разделяют водный поток. Периферические водные массы идут по центробежному пути, в то время как центральный поток воды проходит центростремительный путь. Тела, находящиеся в трубе Шаубергера, обладающие плотностью несколько больше плотности воды и небольших размеров, перемещаются в центр [12].

Так как плотность полиэтилена (1125 кг/м^3) больше плотности морской воды (1030 кг/м^3), то при прохождении через трубу Шаубергера частицы полиэтилена будут скапливаться в центре трубы [13, 14].

Трубу Шаубергера можно разместить внутри измерительной трубы, через которую проходят потоки воды (рисунок 2). В левой части поверхности трубы Шаубергера необходимо сделать отверстия диаметром 5 мм с шагом в 10 мм. Это необходимо для того, чтобы в трубу попадали только частицы размером менее 5 мм.

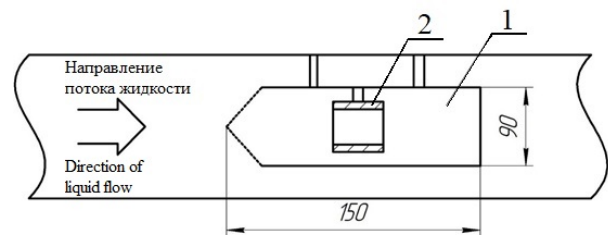


Рисунок 2 – Расположение трубы Шаубергера внутри измерительной трубы: 1 – труба Шаубергера; 2 – втулка с оптической системой

Figure 2 – Location of the Schaubberger tube inside the measuring tube: 1 – Schaubberger tube; 2 – bushing with optical system

С помощью трубы Шаубергера создается разделение потоков воды, в результате чего частицы полиэтилена будут двигаться в центральном потоке и проходить через втулку с оптической системой (рисунок 2).

На рисунке 3 приведена структурная схема установки для лазерного зондирования водной среды.

Установка содержит трубу Шаубергера, в которой находятся передающая и приёмная части электронно-оптической схемы установки, а также блок питания и управления 12. Передающая часть содержит лазер 1, блок сложения импульсов 2, оптический разветвитель 3, который разделяет излучение, выстраивая

его в полосу, и направляет излучение в коллимирующую систему 4. Коллиматор уменьшает расходимость лазерного излучения, обеспечивая сканирование водного потока. Оптическое излучение с помощью блока излучателей 5 зондирует водную среду 6. Излучение лазера, которое не было поглощено водой и микрочастицами, попадает через приёмную систему 7 на фотоприёмный блок 8 и далее на усилитель 9. Усиленный сигнал поступает в блок обработки 10 и далее в радиопередатчик 11. По каналу радиосвязи полученные данные поступают в центр управления беспилотным судном, а именно, в приёмную станцию, которая в свою очередь передает сигнал в персональный компьютер. Компьютер, используя специальное программное обеспечение, определяет наличие или отсутствие полиэтилена в сканированной области водной среды. В результате оператор на основе полученной информации контролирует работу установки и загрязненность микропластиком водной среды.

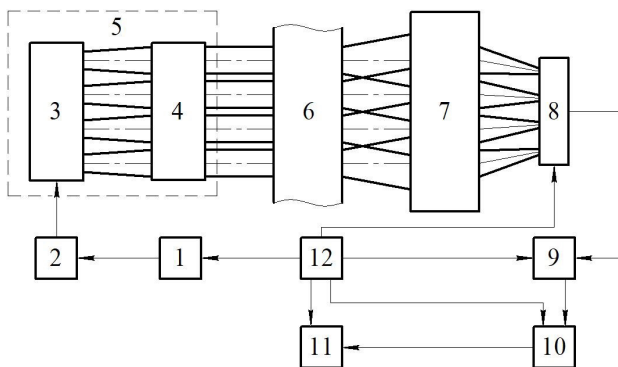


Рисунок 3 – Структурная схема установки: 1 – лазер; 2 – блок сложения импульсов, включающий в себя средство кольцевой оптической задержки, коммутирующее устройство, фокусирующую систему, счётчик импульсов; 3 – оптический разветвитель; 4 – коллимирующая система; 5 – блок излучателей; 6 – водная среда; 7 – приемная система; 8 – фотоприёмный блок; 9 – усилитель; 10 – блок обработки; 11 – радиопередатчик; 12 – блок питания и управления

Figure 3 – Structural scheme of setup: 1 – laser; 2 – beam combining unit, including a means of ring optical delay device, commutating device, focusing system, pulse counter; 3 – optical splitter; 4 – collimating system; 5 – radiation unit; 6 – water environment; 7 – receiving system; 8 – optical receiver unit; 9 – amplifier; 10 – processing block; 11 – radio transceiver; 12 – power supply and control unit

Фиксация и идентификация микрочастиц в выделенном объёме воды, определяемом размерами втулки в основной трубе потока воды, требует решения ряда проблем.

Во-первых, это выбор длины волны зондирования исследуемого объёма водной среды. Анализ спектра микропластика из полиэтилена показал, что резкое поглощение излучения происходит в диапазоне длин волн 3,0–3,5 мкм, а точнее в области двух пиков в спектре поглощения излучения полиэтиленом (3,426 и 3,507 мкм). При этом на этих длинах волн коэффициент поглощения излучения водой менее 40 %, а коэффициент поглощения оптического излучения полиэтиленом на указанных длинах волн составляет 80 и 90 процентов соответственно [13–17]. Следовательно, при зондировании импульсами лазерного излучения в этом диапазоне длин волн с амплитудой, превышающей порог распознавания, возможна фиксация микропластика в потоке жидкости, движущейся по трубе. Учитывая размеры блока излучателей и фотоприёмного блока, диаметр трубы может быть около 40 мм. В качестве источника излучения можно использовать DFB лазерный диод с длинами волн близкими к указанным пикам в спектре поглощения полиэтилена и выходной мощностью 1 мВт.

Во-вторых, в малом объёме воды во втулке возможно появление одновременно нескольких микрочастиц на одной условно линии длиной 5–10 мм. Перекрытие нескольких частиц в направлении пучка излучения, а также поворот частицы ребром не будут зафиксированы, но вероятность таких положений микрочастиц мала. Для фиксации нескольких частиц предложено использовать мозаичный фотоприёмник, содержащий около десяти чувствительных площадок, расположенных в линейку, размером около 10 мм. Это позволяет одновременно фиксировать около десятка микрочастиц. Со стороны излучателя установлен элемент формирования излучения в световую плоскость, перпендикулярную к потоку жидкости во втулке.

Кроме того, одной из проблем реализации проекта является создание режима энергосбережения при работе микрокатера. При этом наибольшие затраты энергии идут на работу двигателя катера и лазера, непрерывно генерирующего излучение для зондирования

потока воды для выявления микрочастиц пластика. Выбор экономичного двигателя возможен при использовании импульсных микродвигателей. Экономия энергии на питание лазера возможна при использовании систем накопления энергии импульсов излучения с применением кольцевой линии задержки на оптоволокну [18, 19]. Действие таких предлагаемых устройств заключается в синхронном сложении нескольких лазерных импульсов, поступающих последовательно на вход кольцевой линии задержки, без увеличения энергопотребления лазера. При этом пучок, циркулирующий в кольце, накапливает в себе за счёт сложения энергию излучения с каждым обходом по линии задержки. В системе происходит суммирование лазерных импульсов, при этом линия задержки обеспечивает синхронизацию предыдущего импульса с последующим, поступающим в неё от лазерного источника.

В данной работе предлагается использовать в составе разрабатываемого микрокатера систему, содержащую несколько кольцевых линий задержки, так как расчеты показывают, что применение 2–3 колец задержки позволит поднять энергию импульса зондирования более чем в 10 раз без увеличения энергии питания, потребляемой источником лазерного излучения [18]. Данные линии задержки должны быть изготовлены из волоконных световодов, прозрачных для лазерного излучения на длине волны около 3,5 мкм. В качестве них можно использовать, например, оптоволокна, приведенные в работе [20].

Предлагаемая система, позволяющая повысить мощность зондирующего излучения при сохранении энергопотребления на прежнем уровне, представлена на рисунке 4. Она состоит из задающего перестраиваемого генератора прямоугольных импульсов 1, импульсного лазера 2 и нескольких звеньев, соединённых последовательно. Звенья содержат средство кольцевой оптической задержки 3, коммутирующее устройство 4 и счётчик импульсов 6, соединённый с управляющим входом коммутирующего устройства 4. Выход задающего генератора 1 соединён через счётчик импульсов 6 с управляющим входом коммутирующего устройства 4 каждого из звеньев. Блоки 2, 3, 4 оптически связаны между собой. Импульсный лазер 2 соединён со средством 3 кольцевой оптической задержки первого I звена.

Коммутирующее устройство 4 предыдущего звена связано со средством 3 кольцевой оптической задержки следующего за ним звена. Количество звеньев источника излучения определяется затуханием оптического сигнала, циркулирующего по кольцевой линии задержки. Последнее k звено соединено с фокусирующей системой 5.

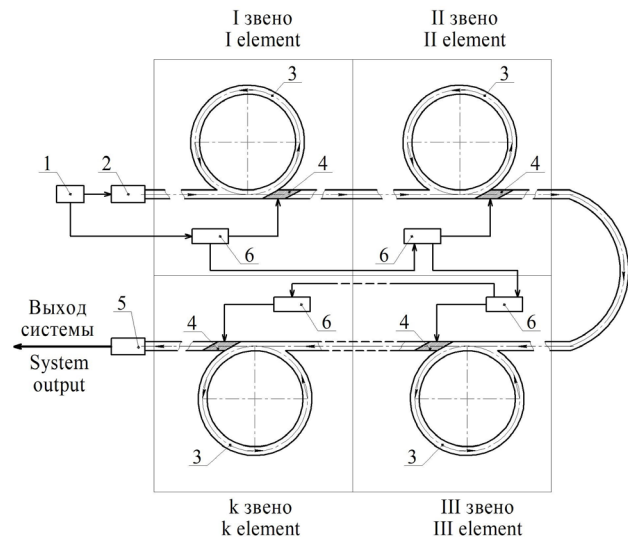


Рисунок 4 – Схема источника импульсного лазерного излучения: 1 – задающий генератор; 2 – импульсный лазер; 3 – средство кольцевой оптической задержки; 4 – коммутирующее устройство; 5 – фокусирующая система; 6 – счётчик импульсов

Figure 4 – Diagram of a pulsed laser radiation source: 1 – master generator; 2 – pulsed laser; 3 – ring optical delay device; 4 – commutating device; 5 – focusing system; 6 – pulse counter

Источник импульсного лазерного излучения работает следующим образом. Импульсы с задающего генератора 1 поступают на вход импульсного лазера 2. Импульсы оптического излучения с лазера 2 через заданный период T поступают на средство кольцевой оптической задержки 3 первого I звена. Импульс оптического излучения циркулирует по кольцу оптоволокну до момента поступления в линию задержки нового импульса от лазера, и цикл продолжается до определённого количества оборотов N_1 , зависящего от допустимого затухания в линии задержки. При этом с выхода счётчика импульсов 6, настроенного на частоту $(1/T)$, на управляющий вход коммутирующего устройства 4 поступают электрические импульсы с частотой в N_1 раз меньше частоты $(1/T)$ импульсов, вырабатываемой задающим генератором 1. При поступлении

электрического импульса со счётчика 6 на управляющий вход коммутирующего устройства 4, коммутирующее устройство переключает канал циркуляции оптического излучения по кольцевой оптической задержке 3 на выход коммутирующего устройства 4, где формируется импульс оптического излучения с амплитудой, равной сумме интенсивностей импульсов лазерного излучения, поступивших на вход средства кольцевой оптической задержки за период $N_1 \cdot T$, определяемый периодом следования импульсов со счетчика 6. Далее усиленный оптический импульсный сигнал с выхода коммутирующего устройства 4 первого *I* звена источника излучения поступает на средство кольцевой оптической задержки 3 второго *II* звена источника излучения и после заданного числа циркуляций N_2 по линии задержки, определяемого счётчиком 6, настроенного на частоту $(1/N_1 \cdot T)$, второго *II* звена источника излучения, поступает на вход коммутирующего устройства 4 второго *II* звена источника излучения. С выхода коммутирующего устройства 4 усиленный оптический сигнал поступает на элементы в третьем *III* звене источника излучения. Аналогичный процесс усиления оптического импульсного сигнала происходит и в следующих звеньях *III* – *k*. В последнем *k* звене счётчик импульсов 6 настроен на частоту $(1/N_1 N_2 \dots N_{k-1} T)$. На выходе коммутирующего устройства последнего *k* звена усиленный в результате синхронного сложения импульсов лазерный пучок фокусируется фокусирующей системой 5. При этом частота следования импульсов на выходе устройства будет в $N_1 N_2 \dots N_k$ раз ниже частоты $(1/T)$ излучаемых лазером исходных импульсов.

В результате на выходе предложенного устройства образуется импульсное лазерное излучение, значительно превосходящее по интенсивности импульсы на выходе первого *I* звена источника лазерного излучения и исходных импульсов излучения лазера 2.

Для регистрации излучения после прохождения потока воды в диапазоне более 3 мкм можно использовать фотодиоды, работающие в диапазоне длин волн 3,2–3,5 мкм [21]. Управление катером происходит по радиосвязи, маршрут движения создаётся с помощью компьютера, находящегося в центре управления на берегу. По этой связи передаются данные о фиксации микрочастиц. Основным

показателем, получаемым при обнаружении частиц, является отношение количества частиц к объёму воды, прошедшей за определенное время через трубу исследования воды. При движении катера вдоль условной линии курса движения катера будет получена характеристика распределения частиц по этой линии. При обнаружении скопления частиц возможно осуществить управляемое движение катера, осуществляя сканирование определённого места акватории водоёма. Это позволит строить карты пятен скопления микрочастиц в исследуемой акватории.

Заключение

Получено решение по созданию автономного микрокатера с лазерным устройством для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов для исследования акватории крупных водоёмов на загрязнения микрочастицами пластика.

При этом предложено решение двух основных задач: обнаружение микрочастиц полиэтилена в толще водной среды и экономное по энергии, затрачиваемое на питание лазера. Лазерное зондирование среды производится импульсами, которые получены в результате сложения пачки импульсов при уменьшении частоты повторения импульсов без увеличения энергии питания лазера (пассивный метод).

Первая задача решена, благодаря использованию трубы Шаубергера, которая обеспечивает скопление микрочастиц пластика в центре исследуемого потока водной среды и свойства полиэтилена, у которого пик поглощения лазерного излучения на длине волны около 3,5 мкм на порядок превышает поглощение водой на этой длине волны.

Вторая задача решена за счёт применения схемы увеличения энергии импульса излучения с использованием оптоволоконной линии задержки, что позволяет на порядок снизить энергозатраты на генерацию лазерного излучения. Обе задачи подтверждены патентами на изобретение и полезную модель.

Решение указанных двух задач обеспечивает создание микрокатера для исследования акватории водоёмов на загрязнения микропластиком.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке научного оборудо-

дования для экспедиционных исследований водоёмов и получения информации в режиме реального времени.

Список использованных источников

1. Plastic Pollution in the World's Oceans [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913> (дата доступа: 04.05.2023).

2. Ильина О.В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала / О.В. Ильина, М.Ю. Колобов, В.В. Ильинский // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48. – № 1. – С. 42–51. DOI: 10.31857/S0321059621010181

3. Зобков М.Б. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов / М.Б. Зобков, Е.Е. Есюкова // Океанология. – 2018. – Т. 58. – № 1. – С. 149–157. DOI: 10.7868/S0030157418010148

4. Lenz R., Labrenz M. Small Microplastic Sampling in Water: Development of an Encapsulated Filtration Device. *Water*, 2018, vol. 10, iss. 8, p. 1055. DOI: 10.3390/w10081055

5. Hildebrandt L. [et al.] Evaluation of continuous flow centrifugation as an alternative technique to sample microplastic from water bodies. *Marine Environmental Research*, 2019, vol. 151, p. 104768. DOI: 10.1016/j.marenvres.2019.104768

6. Патент 206110 РФ, МПК G01N 1/02. Пробо-отборник для определения содержания микропластика в морской воде (HydroPuMP) / А.А. Ершова, Ю.А. Татаренко // Заявитель: Российский государственный гидрометеорологический университет. Заявка № 2020144043 от 28.12.2020. Оpubл. 24.08.2021. Бюл. № 24.

7. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol*, 2012, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075 DOI: 10.1021/es2031505

8. Ourgaud M. [et al.] Identification and Quantification of Microplastics in the Marine Environment Using the Laser Direct Infrared (LDIR) Technique. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 9999–10009. DOI: 10.1021/acs.est.1c08870

9. Yang J. [et al.] Microplastics in different water samples (seawater, freshwater, and wastewater): Methodology approach for characterization using micro-FTIR spectroscopy. *Water Research*, 2023, vol. 232, no. 1. p. 119711 DOI: 10.1016/j.watres.2023.119711

10. Coldewey D. Sairdronе takes the wraps off its Voyager autonomous research vessel. *Tech Crunch*, March 2023. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.sairdronе.com/technology/vehicles> (дата доступа: 04.05.2023).

11. Патент 2775302 РФ, МПК G01N 1/10, G01N 21/01. Устройство для отбора и оценки проб жидкости / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, С.И. Юран // Заявитель Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. Заявка № 2021130069 от 14.10.2021. Оpubл. 29.06.2022. Бюл. № 19.

12. Шаубергер В. Энергия воды / В. Шаубергер. – Москва: Эксмо, 2007. – 320 с.

13. Збинден Р. Инфракрасная спектроскопия высокополимеров / Р. Збинден. – М.: Мир, 1966. – 355 с.

14. Шыхалиев К.С. Изучение механизма сшивания и структуры сшитого полиэтилена / К.С. Шыхалиев // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 4. – С. 73–77.

15. Спектры молекул и твердых тел. Спектр поглощения воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/644303/> (дата доступа: 04.05.2023).

16. Юхневич Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды / Г.В. Юхневич. – М.: Наука, 1973. – 210 с.

17. Купцов А.Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – Москва: Техносфера, 2013. – 696 с.

18. Алексеев В.А. Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки / В.А. Алексеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 151–159. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

19. Патент 189439 РФ, МПК H01S 3/10, G02B 6/00. Источник импульсного лазерного излучения / В.А. Алексеев [и др.] // Заявитель Ижевский ГТУ имени М.Т. Калашникова. Заявка №2018137513 от 23.10.2018. Оpubл. 22.05.2019. Бюл. № 15.

20. Отечественные разработки ИК оптических материалов на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия / Л.В. Жукова [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 6. – С. 763–773. DOI: 10.21883/OS.2018.12.46936.156-18

21. Mid-Infrared (MIR) Photodiode: Electro Optical Components, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eoc-inc.com/> (дата доступа: 03.06.2023).

References

1. Plastic pollution of the world's oceans [Electronic Resource]. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913> (accessed: 04.05.2023).

2. Il'ina O.V., Kolobov M.YU., Il'inskij V.V. *Plastikovoе zagryaznenie pribrezhnyh poverhnostnyh vod*

srednego i yuzhnogo Bajkala [Plastic pollution of the coastal surface water in the middle and southern Baikal]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2021, vol. 48, no. 1, pp. 56–64 (in Russian).

DOI: 10.1134/S0097807821010188

3. Zobkov M.B., Esyukova E.E. *Mikroplastik v morskoy srede: obzor metodov otbora, podgotovki i analiza prob vody, donnyh otlozhenij i beregovyh nanosov* [Microplastics in the marine environment: review of methods for sampling, preparation and analysis of water samples, bottom sediments and coastal sediments]. *Okeanologiya* [Oceanology], 2018, vol. 58, no. 1, pp. 149–157 (in Russian). **DOI:** 10.7868/S0030157418010148

4. Lenz R., Labrenz M. Small Microplastic Sampling in Water: Development of an Encapsulated Filtration Device. *Water*, 2018, vol. 10, iss. 8, p. 1055.

DOI: 10.3390/w10081055

5. Hildebrandt L., Voigt N., Zimmermann T., Reese A., Proefrock D. Evaluation of continuous flow centrifugation as an alternative technique to sample microplastic from water bodies. *Marine Environmental Research*, 2019, vol. 151, p. 104768.

DOI: 10.1016/j.marenvres.2019.104768

6. Ershova A.A., Tatarenko Yu.A. *Probootbornik dlya opredeleniya sodержaniya mikro-plastika v morskoy vode (Hydro PuMP)* [Sampler for determining the content of microplastics in seawater (Hydro PuMP)]. Patent RF, no. 206110, 2021.

7. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075. **DOI:** 10.1021/es2031505

8. Ourgaud M., Phuong N.N., Papillon L., Panagiotopoulos C., Galgani F., Schmidt N., Fauvelle V., Brach-Papa C., Sempéré R. Identification and Quantification of Microplastics in the Marine Environment Using the Laser Direct Infrared (LDIR) Technique. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 9999–10009.

DOI: 10.1021/acs.est.1c08870

9. Yang J., Monnot M., Sun Y., Asia L., Wong-Wah-Chung P., Doumenq P., Moulin P. Microplastics in different water samples (seawater, freshwater, and wastewater): Methodology approach for characterization using micro-FTIR spectroscopy. *Water Research*, 2023, vol. 232, no. 1, April, p. 119711. **DOI:** 10.1016/j.watres.2023.119711

10. Coldewey D. Saildrone takes the wraps off its Voyager autonomous research vessel. Tech Crunch,

March 2023. [Electronic Resource]. Available at: <https://www.saildrone.com/technology/vehicles> (accessed: 04.05.2023).

11. Alekseev V.A., Usoltsev V.P., Yuran S.I. *Ustrojstvo dlya otbora i ochenki prob zhidkosti* [Device for sampling and evaluation of liquid samples]. Patent RF, no. 2775302, 2022.

12. Schaubberger V. *Energiya vody* [Water energy]. Moscow, Eksmo Publ., 2007, 320 p.

13. Zbinden R. *Infrakrasnaya spektroskopiya vysokopolimerov* [Infrared spectroscopy of high polymers]. Moscow, Mir Publ., 1966, 355 p.

14. Shyhaliev K.S. *Izuchenie mekhanizma sshivaniya i struktury sshitogo polietilena* [Study of the mechanism of crosslinking and the structure of cross-linked polyethylene]. *Evrazijskij soyuz uchenyh* [Eurasian Union of Scientists], 2018, no. 4, pp. 73–77 (in Russian).

15. *Spektry molekul i tverdyh tel. Spekr pogloshcheniya vody* [Spectra of molecules and solids. Water absorption spectrum] [Electronic Resource]. Available at: <http://www.myshared.ru/slide/644303/> (accessed: 04.05.2023) (in Russian).

16. Yuhnevich G.V. *Infrakrasnaya spektroskopiya vody* [Infrared spectroscopy of water]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 210 p.

17. Kuptsov A.H., Zhizhin G.N. *Fur'e-KR i Fur'e-IK spektry polimerov* [Fourier-Raman and Fourier-IR spectra of polymers]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013, 696 p.

18. Alekseev V.A., Zaripov M.R., Perminov A.S., Sitnikova E.A., Usol'tsev V.P., Yuran S.I. Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-Optic Delay Line. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 151–159 (In Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

19. Alekseev V.A., Yuran S.I., Perminov A.S., Usoltsev V.P., Zaripov M.R. *Istochnik impul'snogo lazernogo izlucheniya* [Source of pulsed laser radiation]. Patent RF, no. 189439, 2019.

20. ZHukova L.V., L'vov A.E., Korsakov A.S., Salimgareev D.D., Korsakov V.S. [Domestic developments of IR optical materials based on solid solutions of silver halides and mono-valent thallium]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2018, vol. 125, iss. 6, pp. 763–773 (in Russian).

DOI: 10.21883/OS.2018.12.46936.156-18

21. Mid-Infrared (MIR) Photodiode: Electro Optical Components, Inc. [Electronic Resource]. Available at: <http://www.eoc-inc.com/> (accessed: 03.06.2023).