

УДК 533.6.055

Методы оптического мониторинга нефтяного загрязнения морских акваторий с использованием беспилотных летательных аппаратов

О.А. Букин¹, Д.Ю. Проценко^{1,2}, А.А. Чехленок¹, Д.А. Коровецкий^{1*}

¹Морской государственной университет им. адмирала Г.И. Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

²Дальневосточный федеральный университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Поступила в редакцию 25.01.2019 г.

Приведены результаты разработок новых методик и технических средств, позволяющих использовать малогабаритные беспилотные летательные аппараты для проведения экологического мониторинга морских акваторий согласно требованиям международной конвенции МАРПОЛ 73/78. Представлены итоги создания аппаратно-программного комплекса системы распознавания нефтяных разливов с использованием элементов искусственного интеллекта, а также результаты лабораторных экспериментов по идентификации разливов нефтепродуктов методами лазерной индуцированной флуоресценции и регистрации спектра восходящего солнечного излучения.

Ключевые слова: экологический мониторинг, искусственный интеллект, машинное обучение, лазерная индуцированная флуоресценция, спектроскопия, МБПЛА; environmental monitoring, artificial intelligence, machine learning, laser-induced fluorescence, spectroscopy, UAVs.

Введение

Разработка новых методов оперативного экологического мониторинга морских акваторий в настоящее время очень актуальна. Это связано, во-первых, с тем, что значительные площади морского шельфа становятся предметом промышленной деятельности по разведке, добыче и транспортировке углеводородного сырья; во-вторых, со сбросом в море загрязненной нефтью воды в процессе эксплуатации морских судов (ляльные воды). Загрязнения ляльными водами выходят на первый план в связи с интенсивным ростом морских транспортных перевозок. По оценкам [1], абсолютные объемы таких загрязнений составляют более 60% от общего объема загрязнений нефтепродуктами. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ) устанавливает требования к содержанию нефтепродуктов в ляльных водах в пределах 15 ppm [2]. Однако всего 1% судов – нарушителей конвенции МАРПОЛ подвергаются реальным наказаниям в виде штрафных санкций [3]. Это объясняется отсутствием оперативных, недорогих и доступных технологий мониторинга нефтяных загрязнений морских акваторий регионального масштаба.

Технологии мониторинга нефтяных загрязнений глобального масштаба работают в настоящее время достаточно успешно. Это показал опыт мониторинга таких катастроф, как, например, на нефтяной платформе Deerwater Horizon в 2010 г. в Мексиканском заливе или катастрофа танкера SANCHI в Южно-Китайском море в 2018 г. Однако технологии глобального мониторинга очень дорогие и включают в себя различные элементы инфраструктуры (спутники, самолеты, суда, аппаратные комплексы, программное обеспечение, специалистов в области спутникового мониторинга, программистов и т.д.), которая определяется размерами аварии и может значительно меняться в зависимости от ее последствий [4]. Все это обуславливает их использование только в исключительных случаях.

Для постоянного мониторинга локальных акваторий, где наиболее вероятны аварийные ситуации регионального масштаба при промышленной деятельности на морском шельфе или сбросы ляльных вод с морского транспорта, необходимо разработать автономную систему морских роботов, которые функционируют в подводной среде и контролируют морскую поверхность, что позволит системе осуществлять мониторинг обеих сред.

Возможность мониторинга подводной среды в пределах глубины шельфа океана подразумевает использование автономных подводных аппаратов до глубин порядка 300 м, в пределах которых подводный аппарат должен обеспечивать обнаружение

* Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Дмитрий Юрьевич Проценко (dima.prsk@mail.ru); Алексей Анатольевич Чехленок (alexeyche88@gmail.com); Денис Андреевич Коровецкий (318704@mail.ru).

растворенных в морской воде углеводородов нефти на уровне требований МАРПОЛ. Результаты лабораторных экспериментов по разработке аппаратно-программных оболочек лазерной сенсорики для подводных аппаратов приводятся в [5, 6].

Важная составляющая мультиагентной системы — надводные беспилотные агенты, контролирующие водную поверхность. На морской поверхности необходимо регистрировать и измерять параметры нефтяной пленки или, в случае льяльных вод, концентрацию растворенных в морской воде углеводородов нефти на уровне 15 ppm.

В данной статье приведены результаты разработки аппаратно-программного комплекса для малогабаритного беспилотного летательного аппарата (МБПЛА), который должен обеспечить мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности регионального масштаба.

1. Выбор методов мониторинга морской поверхности с использованием МБПЛА

К настоящему времени разработан довольно широкий спектр как активных, так и пассивных методов дистанционного зондирования морской поверхности. Основные требования при отборе возможных методов мониторинга с МБПЛА предъявляются к массо-габаритным параметрам аппаратуры и необходимой энергетике для их реализации. В конечном варианте нужна такая система, которая была бы доступна по стоимости, обеспечивала оперативные обследования, не требовала специальной инфраструктуры и осуществляла полностью автоматизированные измерения и обработку данных. На выходе системы должны быть данные об объеме загрязнения и типе нефтепродуктов.

Самая первая задача, которую требуется решить, — обеспечение автоматической идентификации нефтяного пятна на морской поверхности и расчет вероятности того, что это пятно является именно нефтяным загрязнением, а не сликом, вызванным природными процессами. Данная задача сводится к распознаванию изображений и решается методом компьютерного обучения. Таким образом, необходимо разработать соответствующие программы, создать подходящий архив данных и обеспечить на МБПЛА соответствующие параметры системы видеозахвата и микрокомпьютера.

Для решения задачи определения объемов нефтяного загрязнения и идентификации типов загрязнителя с МБПЛА можно использовать пассивные методы регистрации спектра восходящего с морской воды излучения во всей спектральной полосе гиперспектрального дистанционного зондирования: в видимом диапазоне спектра от 300 до 800 нм и в ближней ИК-области от 1000 до 2500 нм [7]. Разрабатывая МБПЛА для оперативного и автома-

тизированного мониторинга морских акваторий в портах, местах бункеровки и сброса льяльных вод морскими судами, мы ограничиваем вес аппаратуры, необходимой для мониторинга морской поверхности (до 3–5 кг), габариты (не более 35 × 35 × 35 см) и энергопотребление (не более 150 Вт/ч). Вышеперечисленное ограничивает нас в использовании только видимого диапазона спектральной полосы гиперспектрального дистанционного зондирования, однако позволяет использовать МБПЛА, которые не требуют соответствующей инфраструктуры для эксплуатации и специально подготовленного персонала.

Мы ставим задачу разработки такого элемента искусственного интеллекта робота, который сможет автоматически относить нефтяное пятно к одному из кодов согласно системе кодирования нефтяного загрязнения по внешнему виду пятна, описанной в Боннском соглашении [8].

Существенным развитием методики кодирования пленок, которая предложена в этом соглашении, будет проведение анализа спектров восходящего от этих пленок излучения и разработка соответствующего метода классификации пленок. Объединение существующего метода кодировки по внешнему виду с классификацией нефтяных пленок по спектрам восходящего излучения необходимо осуществлять с использованием метода компьютерного обучения, что позволит МБПЛА автономно оценивать объемы загрязнения. Однако спектры восходящего от пленок излучения очень сильно зависят от спектрального состава падающего на морскую поверхность солнечного излучения, которое освещает пятно, т.е. от времени суток и состояния атмосферы, что значительно ограничивает возможности метода. Кроме того, для легких фракций нефти и тонких пленок метод определения толщины пленок по спектральному составу восходящего излучения становится чисто качественным. Поэтому при оценке тонких пленок целесообразно использовать еще и метод лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) в лидарной реализации.

Итак, на сегодняшний день наиболее оптимальным способом создания автономного комплекса для мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности на базе МБПЛА является сочетание двух методов: дистанционного зондирования цвета морской поверхности и ЛИФ. Это позволит снять некоторые ограничения, которые накладывают условия освещения морской поверхности на использование этих методов по отдельности. Например, при высоком уровне солнечного излучения и при отсутствии облачности использование метода ЛИФ становится проблемным из-за высокого уровня фона в спектральных интервалах сигнала флуоресценции нефтяных пленок, а при наличии облачности — наоборот. Практически одинаковые спектральные интервалы излучения, которые требуется регистрировать при использовании обоих методов, позволят обходиться одним комплектом спектральной аппаратуры, что очень важно для МБПЛА.

2. Программа идентификации нефтяных пленок на морской поверхности

Первый этап оснащения МБПЛА искусственным интеллектом — разработка программного обеспечения, которое позволит автоматически идентифицировать нефтяное пятно на морской поверхности по снимкам с видеокамеры. В нашем случае программный элемент системы распознавания нефтяных разливов реализован с помощью языка программирования Python. Для работы с изображениями была использована библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом OpenCV. В качестве компонента классификации применялась нейронная сеть, реализованная с помощью библиотеки Keras с фреймворком Tensorflow.

Сеть была обучена классифицировать изображения по наличию или отсутствию нефтяных разливов на водной поверхности методами Deep Learning. Структурная схема работы программного элемента распознавания представлена на рис. 1.

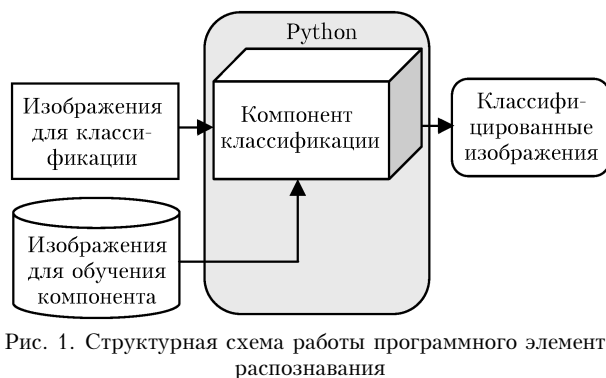


Рис. 1. Структурная схема работы программного элемента распознавания

Изображение относится к одному из трех классов: нефтяной разлив, чистая водная поверхность, ни то, ни другое. Программа протестирована на реальном загрязнении в 2017 г. в Амурском заливе [9], источником которого стала авария при бункеровке судна. Результат работы программы показан на рис. 2. Вероятность наличия нефтяного пятна (oil spill) равна единице, когда оно попадает в угол поля зрения видеокамеры.

3. Измерение спектров восходящего излучения от различных нефтяных пленок

Следующим этапом в разработке методики мониторинга является классификация спектров восходящего от морской поверхности излучения при наличии различных нефтяных пленок. Необходимо разработать метод классификации, который привел бы в соответствие различные классы спектров восходящего излучения к системе кодов классификации по внешнему виду нефтяной пленки [8], т.е.



Рис. 2. Результат работы программы распознавания пятен

к той кодировке нефтяных пятен, которая представлена в таблице. Это позволит осуществлять полностью автоматизированный процесс отнесения нефтяных загрязнений к соответствующим кодам с использованием искусственного интеллекта МБПЛА. В настоящее время предложенная система кодов используется для оценки объемов нефтяных загрязнений специально обученными операторами [8].

Система кодирования внешнего вида нефти по Боннскому соглашению (действует с января 2004 г.)

Код	Внешний вид	Диапазон толщины слоя, мкм	Объем нефти на единицу площади, л/км ²
1	Блестящий (серебристо-серый)	0,04–0,3	40–300
2	Радужный	0,3–5	300–5000
3	Металл	5–50	5000–50000
4	Прерывистый истинный цвет	50–200	50000–200000
5	Непрерывный истинный цвет	> 200	> 200000

Пример, демонстрирующий возможность проведения подобной классификации, приведен на рис. 3, где представлены спектры восходящего излучения от пленок сырой нефти различной толщины на морской поверхности.

На рис. 3, а показаны нормированные на максимальное значение относительные распределения интенсивности восходящего излучения. На рис. 3, б — ненормированные распределения в относительных единицах. Из графиков видно, что относительные распределения интенсивности и сама интенсивность спектра заметно меняются при увеличении толщины пленки. В настоящее время мы отработаем методику, которая позволяет объединить классификацию нефтяных пятен на поверхности согласно кодам по внешнему виду (см. таблицу) и спектрам восходящего от пленок излучения. Основной проблемой при разработке данной методики является отсутствие соответствующих архивов данных о спектрах восходящего излучения от пленок сырой нефти и различных типов нефтепродуктов на морской

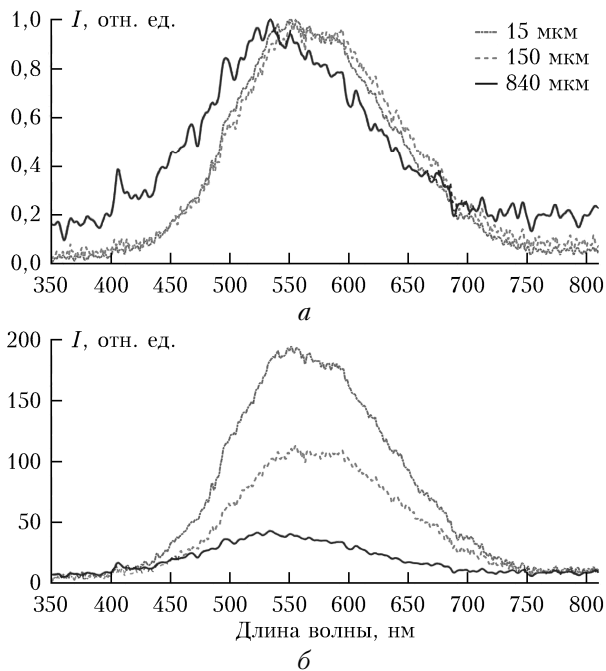


Рис. 3. Спектры восходящего излучения от пленок сырой нефти различной толщины на морской поверхности: нормированные на максимальное значение относительные распределения интенсивности восходящего излучения (а); ненормированные распределения в относительных единицах (б)

поверхности в количестве, достаточном для компьютерного обучения. Поэтому проводятся эксперименты в лабораторном бассейне с целью создания подобного архива данных.

4. Спектроскопия лазерной индуцированной флуоресценции

Мониторинг водной поверхности с использованием МБПЛА — более сложная задача, чем мониторинг подводной среды с использованием ЛИФ-спектрометра. В последнем случае необходимо измерять только концентрации растворенных в морской воде нефти или нефтепродуктов при не очень высоких значениях уровня светового фона. Использование лазерных источников излучения для возбуждения ЛИФ исследуемых растворов нефти в морской воде значительно облегчает эту задачу. В [5] нами проведены исследования особенностей спектрального распределения ЛИФ для различных сортов растворенных углеводородов нефти в морской воде, а также пределов обнаружения для различных растворов нефтепродуктов с использованием метода ЛИФ в подводных вариантах спектрометров.

В настоящее время для варианта погружаемого ЛИФ-спектрометра проводится разработка методики компьютерного обучения для распознавания сортов топлива по ЛИФ-спектрам. В качестве признаков описаний используются значения измеренных спектров. Предполагается предварительная обработка спектров, в частности усреднение, фильтрация и нормировка, а также приведение к единому фор-

мату. Далее из массивов спектров различных типов нефти составляются последовательности данных для извлечения из них признаков. Сформированная из признаков описаний матрица используется для оптимально подобранной модели машинного обучения. В результате полученная модель может применяться для классификации спектров по нужному количеству типов нефти.

Относительно чувствительности спектрометра в [5] показано, что для легких сортов топлива пределы детектирования ($LoD \leq 15 \text{ ppm}$) позволяют проводить мониторинг льяльных вод на уровне требований конвенции МАРПОЛ. Для тяжелых сортов топлива и сырой нефти необходимо повысить чувствительность, чтобы удовлетворить требованиям конвенции. Этого можно достичь путем использования лазеров с более высокой средней мощностью излучения или увеличением времени накопления сигнала.

Возможны два случая нефтяных загрязнений на морской поверхности. Первый — это когда нефтяные загрязнения находятся в виде пленки на морской поверхности. И второй — это льяльные воды, где углеводороды нефти находятся, как правило, в растворенном виде в малых концентрациях. Для отработки методики ЛИФ в варианте с МБПЛА был разработан малогабаритный ЛИФ-спектрометр. В настоящее время проведены эксперименты в лабораторном бассейне только для случая нефтяной пленки на поверхности воды.

На основе трех светодиодов, излучающих в УФ-диапазоне (UV LED B44DD7A1CS0) с центром на длине волны 277 нм, шириной спектра порядка 40 нм, средней мощностью излучения 10 мВт каждый, был разработан излучатель, впоследствии установленный на МБПЛА. Его конструкция позволяет формировать квазипараллельное излучение с углом расходимости порядка 7° . В качестве регистратора спектров использовался малогабаритный спектрометр Ocean-Optics (он применялся для регистрации спектров восходящего от нефтяных пленок излучения, см. разд. 3). На рис. 4 приведены примеры спектров флуоресценции, полученные от пленок на поверхности воды, которые образованы различными сортами судового топлива.

Спектры разных сортов топлива хорошо идентифицируются. В настоящее время разрабатывается методика компьютерного обучения, предназначенная для распознавания различных сортов топлива по спектрам ЛИФ. Для обучения используются ЛИФ-спектры, которые получены в лабораторных условиях для легких (ISO-F DMA, MGO) и тяжелых сортов (ISO-F-RMC 10, ISO-F-RMF 25) судового топлива.

Для оценки объемов нефтяного загрязнения необходимо провести анализ толщины и площади пленки на водной поверхности. Площадь пятен оценивается по изображению с помощью известных программ [10] в рамках процедуры идентификации нефтяных пятен, описанной в разд. 2. Для толстых пленок отрабатывается методика, описанная в Боннском соглашении [8]. Для нефтяных пленок тоньше

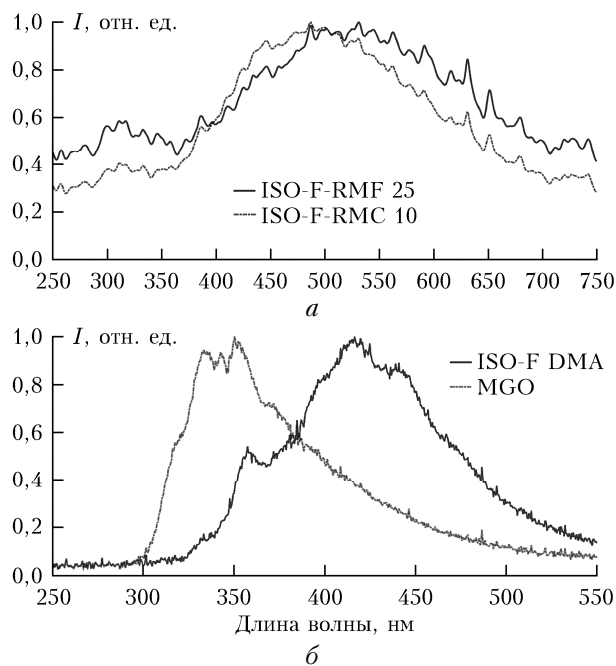


Рис. 4. Примеры спектров флуоресценции, полученные от пленок на поверхности воды, которые образованы различным судовым топливом

300 мкм обрабатывается метод измерения толщины по сигналу флуоресценции.

Заключение

Оперативная автономная система мониторинга нефтяных загрязнений моря регионального масштаба крайне необходима в настоящее время. Подобная система должна удовлетворять всем требованиям и техническим регламентам, которые существуют в международной конвенции МАРПОЛ и Боннском соглашении по предотвращению и мониторингу морских нефтяных загрязнений. Анализ существующих пассивных и активных методов зондирования морской поверхности показал, что объединение двух методов (ЛИФ и гиперспектрального дистанционного зондирования) в едином аппаратно-программном комплексе на МБПЛА является наиболее подходящим вариантом для автономной системы мониторинга нефтяных загрязнений моря.

Автономная система требует разработки искусственного интеллекта, способного не только управлять движением, выбирать маршрут полета, но и идентифицировать нефтяные пятна на морской поверхности, выбирая способ измерения параметров нефтяного разлива и идентификации нефтепродукта. Нами был разработан и испытан в усло-

виях реального нефтяного загрязнения элемент искусственного интеллекта БПЛА, который осуществляет идентификацию нефтяных пятен на морской поверхности. Дальнейшее развитие искусственного интеллекта следует проводить в направлении адаптации оптических методов мониторинга к той системе кодировки нефтяных пятен, которые приняты в Боннском соглашении.

Результаты лабораторных исследований, выполненных нами для некоторых сортов нефтепродуктов, позволяет адаптировать метод измерения спектров восходящего излучения от морской поверхности и метод ЛИФ к системе кодировки нефтяных пленок по внешнему виду. Лабораторные эксперименты проводились с техническими элементами аппаратных комплексов, которые предназначены для использования на БПЛА.

1. *Press Releases* [Electronic resource] // Oceana. URL: <https://eu.oceana.org/en/press-center/press-releases/every-six-minutes-illegal-hydrocarbon-dumping-incident-takes> (last access: 18.12.2018).
2. *Julian M. MARPOL 73/78: the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*. Maritime Studies. 2000. P. 16–23.
3. *The dumping of hydrocarbons from ships into the seas and ocean of eurone* [Electronic resource] // Oceana. URL: <https://oceana.org/reports/dumping-hydrocarbons-ships-seas-and-oceans-europe-other-side-oil-slicks> (last access: 18.12.2018).
4. *Leifer I., Lehr B., Simecek-Beatty D., Bradley E., Clark R.* State of the art satellite and airborne oil spill remote sensing: Application to the BP DeepWater Horizon oil spill // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 124. P. 185–209.
5. *Bukin O.A., Proshenko D.Yu., Chekhlenok A.A., Golik S.S., Bukin I.O., Mayor A.Yu., Yurchik V.F.* Laser Spectroscopic Sensors for the Development of Anthropomorphic Robot Sensitivity // *Sensors*. 2018. V. 18, N 6. P. 1680.
6. *Bukin O.A., Mayor A.Yu., Proshenko D.Y., Bukin I.O., Bolotov V.V., Chekhlenok A.A., Mun S.A.* Laser spectroscopy methods in the development of laser sensor elements for underwater robotics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 5. P. 475–480.
7. *American Petroleum Institute* [Electronic resource]. URL: <http://www.oilspillprevention.org/~media/oil-spill-prevention/spillprevention/r-and-d/oil-sensing-and-tracking/1144-e1-final.pdf> (last access: 3.01.2018).
8. *Bonn Agreement* [Electronic resource]. URL: https://www.bonnagreement.org/site/assets/files/1081/aerial_operations_handbook.pdf (last access: 18.12.2018).
9. Нефтяное пятно с нейросетью [Электронный ресурс] // YouTube. URL: <https://youtu.be/DIYfUyZmWM8> (дата обращения: 4.02.2018).
10. *LProSoft* [Electronic resource]. URL: <http://lprosoft.ua/load/1-1-0-4-lpSquarev5.0-forWindows> (last access: 18.12.2018).

O.A. Bukin, D.Yu. Proshenko, A.A. Chekhlenok, D.A. Korovetskiy. Techniques for optical monitoring of oil pollution of sea waters with the use of unmanned aerial vehicles.

The results of creation of new techniques and technical means that allow the use of small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) in environmental monitoring of marine areas according to the MARPOL 73/78 international convention requirements are presented. The hard- and software complex developed for an oil spill recognition system with elements of artificial intelligence is described. The results of laboratory experiments on the identification of oil spills by the laser induced fluorescence (LIF) along with the technique for recording upward solar radiation spectrum are given.