Дистанционные методы определения толщины плёнок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности

А. А. Мольков[1], И. А. Капустин[1,2], А. В. Ермошкин[1], С. А. Ермаков[1,2]

[1] *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: a.molkov@inbox.ru

[2] *Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

Плёнки на взволнованной водной поверхности морей и океанов являются индикатором процессов, представляющих экологическую угрозу водным объектам и прибрежным районам. Среди них особое место занимают нефтяные разливы, регулярно происходящие при авариях на буровых станциях, авариях танкеров и перекачке топлива. Для количественной оценки возможного ущерба и определения мер по предотвращению катастрофы необходимо располагать информацией об объёме загрязнения, который обычно вычисляется из оценки площади и толщины поверхностной плёнки. Современные инструменты дистанционного зондирования водной поверхности, а точнее их комплекс, позволяют оперативно обнаруживать поверхностные загрязнители, вести их мониторинг и получать информацию о площади покрытия. Одновременно с этим оценивать толщину плёнок на морской поверхности с необходимой точностью на сегодняшний день не представляется возможным. В настоящем обзоре подробно рассмотрены возможности современных инструментов дистанционной диагностики толщины плёнок с указанием ограничений их применимости. Обзор включает пассивные и активные методы оптического и радиодиапазонов, акустические методы, а также их комбинации.

Ключевые слова: морская поверхность, волнение, слики, плёнки ПАВ, нефтяные загрязнения, толщина плёнки, визуальные оценки, ИК-изображение, УФ-изображение, лидарное зондирование, оптоакустика, оптико-акустические методы, радиометрия, радиолокационное зондирование

Одобрена к печати: 18.04.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27

Проблема постоянно нарастающего загрязнения Мирового океана требует разработки новых подходов для оперативного выявления очагов загрязнения и их экспресс-анализа. Важным индикатором загрязнений являются слики, в подавляющем большинстве связанные с плёнками поверхностно-активных веществ (ПАВ) на водной поверхности. Они могут наблюдаться с помощью современных средств активной и пассивной локации оптического и радиодиапазонов судового, авиационного и космического базирования, позволяя получать предварительную информацию о толщине, площади покрытия и динамике распространения (Byfield, 1998; Fingas, 2018; Leifer et al., 2012). При этом оценка толщины плёнок становится одной из наиболее трудных и далёких от решения задач. Анализу имеющихся методов посвящён настоящий обзор. В нём детально рассмотрены физические явления, лежащие в основе наиболее распространённых методов, перечислены основные трудности и ограничения их применения, сформулированы условия и способы повышения их эффективности. Обзор призван привлечь внимание к сложности поставленной проблемы и стимулировать дальнейшее её исследование.

Оптические методы

Визуальное наблюдение

Первые визуальные оценки минимально различимой толщины нефтяной плёнки (0,1 мкм) были получены в ходе исследования процессов растекания нефти в 1930 г. вблизи Гавайских островов (Congress, 1930). В 1969 г. Американский институт нефти (*англ.* American Petroleum Institute — API) на основе результатов анализа предшествующих натурных наблюдений сформировал таблицу соответствия толщины нефтяной плёнки и её цветового восприятия (Manual..., 1969).

Позднее в связи с интенсивным развитием нефтедобывающей промышленности и учащением техногенных аварий эмпирические знания о цветовом оттенке плёнок и определяющих его факторах накапливались, систематизировались и внедрялись в практические руководства по обнаружению, мониторингу и ликвидации нефтяных загрязнений (Bonn..., 2008; Open..., 2012 и др.). В качестве примера на *рис. 1*, *слева* представлена типичная градация толщины плёнок в привязке к их цветовым оттенкам, а на *рис. 1*, *справа* приведено реальное изображение нефтяной плёнки, демонстрирующее почти все цветовые оттенки, перечисленные на *рис. 1*, *справа*.

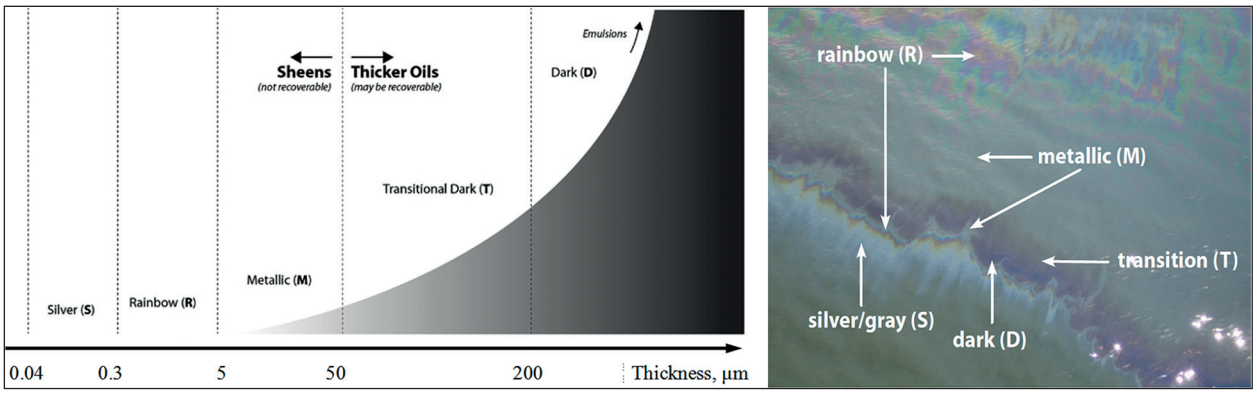

Рис. 1. Взаимосвязь цветового оттенка плёнки с её толщиной (*слева*); пример цветовых вариаций в нефтяном пятне на морской поверхности (*справа*) (Open..., 2012)

Согласно *рис. 1*, самые тонкие визуально регистрируемые плёнки имеют толщину 0,04–0,3 мкм и характеризуются серебристым блеском. Многократная интерференция света в более толстых плёнках (0,3–5 мкм) на случайно неровной водной поверхности приводит к возникновению радужных разводов. Ещё более толстые плёнки с толщиной до 50 мкм имеют металлический отблеск. Плёнки от 50 до 200 мкм характеризуются неоднородными тёмно-коричневыми оттенками, тогда как наиболее толстые плёнки с толщиной более 200 мкм выглядят чёрными. Разумеется, подобные визуальные оценки являлись весьма грубыми и не учитывали разнообразие видов нефти, геометрию наблюдения, условия освещения, неоднородность плёнки нефти по толщине, испарение лёгких фракций нефти, влияние атмосферы и волнения. Значимость первых двух факторов была впервые теоретически рассчитана Хорстейном с учётом эффекта интерференции света в тонких плёнках толщиной до 3 мкм и подтверждена в лабораторном эксперименте (Hornstein, 1972). Автором было продемонстрировано, что за счёт разницы в показателях преломления нефти и воды коэффициент отражения плёнки при надирном наблюдении почти в два раза превосходит коэффициент отражения воды, а в случае наблюдения поверхности под скользящими углами соотношение между коэффициентами отражения меняется на обратное вне зависимости от сорта нефти (ввиду малого различия в показателях преломления разных сортов нефти). Полученный результат имел практическое применение в виде вывода об оптимальных условиях наблюдения

интерференционных картин в слике: надирное наблюдение, отсутствие прямого солнечного света и минимальная яркость водной толщи.

Несмотря на грубость метода определения толщины плёнки по её цветовому оттенку, он до сих пор активно применяется на практике.

Изображения

Видимый диапазон

Для оценки толщины плёнок наряду с использованием визуального способа существуют методы, основанные на анализе спектрального контраста плёнки на фоне воды. В видимом диапазоне (380–750 нм) контраст возникает благодаря двум физическим механизмам. Первый заключается в том, что нефть и нефтепродукты имеют больший по сравнению с водой показатель преломления (в среднем 1,46 против 1,33 соответственно), а значит больший коэффициент отражения и большую яркость. Второй механизм связан с изменением отражательной способности участка поверхности, покрытой плёнкой, вследствие выглаживания волнения. Наиболее ранние исследования проявления этих механизмов в величинах контрастов были реализованы И. Я. Гуревичем, И. М. Левиным, В. Ю. Осадчим, Р. Г. Гардашовым, К. С. Шифриным. На примере вертикального освещения трёхслойной среды с плоскими однородными слоями «воздух – нефть – вода» в работе (Гуревич, Шифрин, 1979) предложена теоретическая модель контраста нефтяных плёнок на фоне чистой воды, учитывающая оптические характеристики нефти и воды. Авторы рассчитали контраст целого ряда сортов нефти с различных месторождений, показав, что средний контраст 40–50 % наблюдается в интервале 0,4–7 мкм, а максимальный контраст 70–80 % приходится на инфракрасную (ИК) область в интервале 8–12 мкм, где коэффициент отражения воды минимален, а нефти — максимален. Вместе с тем в спектрах яркости плёнки на воде были обнаружены минимумы, соответствующие полосам поглощения нефти, близкие к полосам поглощения воды (3,5 и 7 мкм — для нефти, 3 и 6 мкм — для воды) и объясняемые близостью собственных частот колебания молекул водорода относительно молекул кислорода в воде и углерода в нефти (связи O-H и C-H). С появлением атласов гидрооптических характеристик вод И. М. Левин в своей работе (Levin, 1994) показал, что в пасмурный день контраст оказывается нечувствительным к шероховатости взволнованной водной поверхности, в то время как в солнечную погоду контраст может меняться в пределах от –90 до +60 % в зависимости от типа вод, длины волны зондирования, скорости ветра и высоты Солнца. Наибольшие контрасты для чистых океанских вод соответствуют синей и зелёной областям спектра, а для вод с высоким содержанием окрашенного растворённого органического вещества — зелёной и красной (Foudan, 2003). В целом спектры яркости плёнки на воде не только не имеют регулярных особенностей в видимом диапазоне, но и могут быть схожи с проявлениями других процессов в верхнем водном слое, например с цветением водорослей (*рис. 2*). Однако, несмотря на отсутствие регулярных алгоритмов восстановления толщины плёнок, оптические изображения видимого диапазона всё же востребованы как важная часть современных гиперспектральных систем для мониторинга морей и океанов.

а *б* *в*

Рис. 2. Пример «ложного» обнаружения нефтяного загрязнения, вызванного цветением динофитовых (*а*), саргассовых (*б*) и бурых (*в*) водорослей (Leifer et al., 2012)

Ближний и средний ИК-диапазоны

Системы мониторинга водной поверхности в диапазонах 750–1400 нм (ближний ИК) и 1400–3000 нм (средний ИК) широко используются для оценки толщины тонких плёнок и нефтяных эмульсий. Ключевым элементом здесь служат минимумы спектров яркости плёнки, соответствующие полосам поглощения (*рис. 3*), отвечающих колебательным движениям молекул углерода и водорода в плёнках нефти и нефтяных эмульсиях. Глубина «проседания» спектра D в каждом из интервалов зависит от толщины плёнки, уменьшаясь в сторону увеличения длины световой волны. Оценка глубины D проводится для каждого пикселя ИК-изображения по формуле (Clark et al., 2010):

$$D = 1 - \frac{2R_b}{R_l + R_r}, \tag{1}$$

где R_b — яркость в минимуме; R_l и R_r — параметры яркости в максимумах слева и справа от минимума соответственно (см. *рис. 3*, *слева*). После этого формируется цветное изображение, где красному цвету присваиваются значения глубины D из области 2,3 мкм, зелёному — 1,7 мкм, а синему — 1,2 мкм.

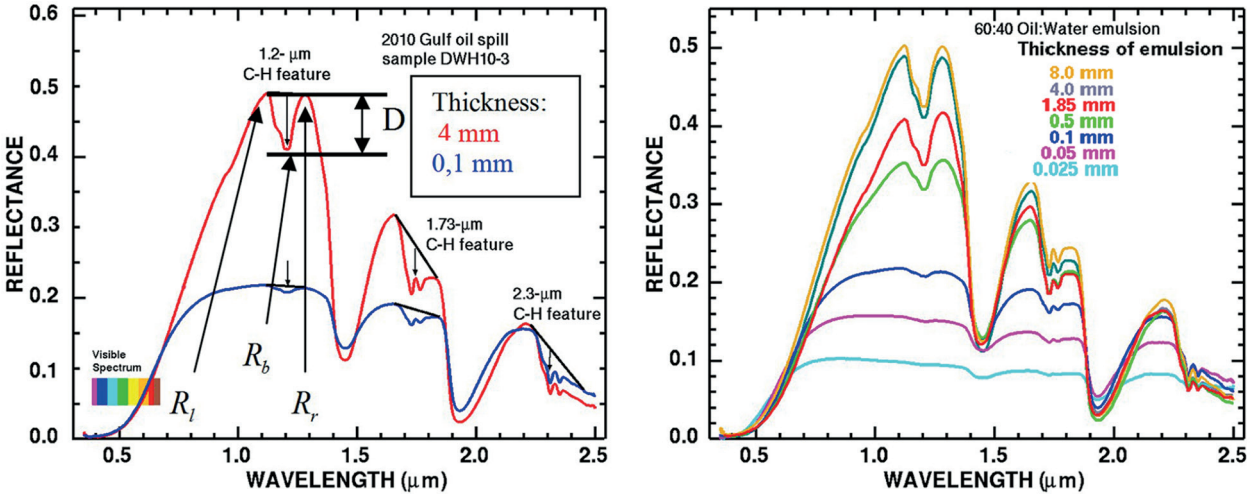

Рис. 3. Спектральные особенности в изображении нефтяной плёнки, используемые для оценки её толщины (*слева*); пример трансформации спектра яркости нефтяной эмульсии с увеличением толщины её слоя (*справа*) (Clark et al., 2010)

Очевидно, что корректная интерпретации спектров яркости, полученных по ИК-изображениям, равно как последующая калибровка цветовых карт в реальные физические поля, невозможны без лабораторных анализов отобранных проб нефтепродуктов. Имеется конкретный диапазон толщины плёнок или эмульсий, для которых работает предложенный метод. Нижний его порог определяется способностью оптической системы детектировать прирост яркости на тонкой плёнке или эмульсии с высоким содержанием воды, т. е. чувствительностью спектроанализатора. На таких объектах поглощение света происходит почти равномерно во всём диапазоне длины световых волн при незначительном рассеянии, что не приводит к проявлению вышеупомянутых маркеров. В толстых плёнках свет поглощается и рассеивается назад, не достигая воды. Из-за этого изменений в спектрах отражения плёнки, начиная с некоторой толщины, не регистрируется (см. *рис. 3*, *справа*).

Интересная вариация рассмотренного метода предложена в работе (Massaro et al., 2012), где в лабораторном эксперименте авторы провели измерения яркости плёнки моторного масла 5W-40 из-под воды путём облучения её светом с длиной волны 1277 нм и регистрации отражённого сигнала под зеркальным углом. Выбранная длина волны света соответствовала правому максимуму спектра яркости плёнки относительно минимума, соответствующего первой

полосе поглощения связей С-Н (1190–1210 нм). На примере двух разных марок масел авторы установили связь между интенсивностью максимума отражательной способности плёнки на длине волны 1277 нм и её концентрацией, однако дальнейшего развития метод не получил.

Дальний ИК-диапазон

Толстые нефтяные плёнки хорошо поглощают солнечную радиацию и переизлучают тепло в диапазоне 8–14 мкм, регистрируемое радиометрами (Goodman, 1988). Спектр яркости плёнки в ИК-диапазоне не имеет ярко выраженной уникальной структуры, зато зависит от толщины плёнки и ряда внешних факторов окружающей среды. Так, днём толстая нефтяная плёнка с толщиной более нескольких сотен микрон кажется «горячей» и выглядит ярким пятном на тёмном фоне воды, формируя положительный контраст, в то время как ночью контраст меняется на обратный (Leifer et al., 2012). Плёнки с промежуточной толщиной от 50–250 мкм, как правило, имеют отрицательный контраст по сравнению с чистой водой. Пороговая толщина плёнки, при которой контраст уверенно регистрируется, обычно составляет около 50 мкм. Более тонкие плёнки (20–50 мкм) обнаруживаются с трудом (Pinel et al., 2015). Несмотря на многочисленные исследования, регулярных соотношений между контрастом плёнки и её толщиной до сих пор не установлено, а теоретических соображений на этот счёт существует относительно мало. Среди последних встречается теория (Shih, Andrews, 2008), утверждающая, что тонкая плёнка, находясь в тепловом равновесии с водной толщей под ней, выглядит более холодной по причине более низкой объёмной излучательной способности, чем у водной толщи, а изменения контраста внутри тонкой неоднородной плёнки могут возникать из-за эффекта интерференции света. В случае толстых плёнок их контраст на фоне чистой воды зависит не только от толщины, но и от целого ряда параметров: интенсивности солнечного излучения, его продолжительности действия, температуры воды и поглощающих свойств нефти (Shih, Andrews, 2008; Wright, Wright, 1973). Взаимосвязь перечисленных параметров и их проявление в ИК-изображениях плёнок разных веществ и толщины до настоящего времени изучена слабо (Fingas, 2018). Среди наиболее значимых попыток достичь результата можно назвать исследования К. Е. Брауна (C. E. Brown) с соавторами (Brown et al., 1998). Авторы провели более 120 лабораторных и натурных экспериментов, используя два типа нефти (лёгкую и тяжёлую), однако не установив надёжную корреляцию между толщиной плёнки и яркостью её ИК-изображения. Толщина исследуемых плёнок лежала в диапазоне от 1 до 10 мм, контролировалась подводным сонаром и дополнительно верифицировалась в лабораторных условиях по пробам. Согласно публикации (Fingas, 2012), возможная причина отсутствия искомой корреляции кроется в том, что ИК-радиометры получают данные о температуре тончайшего верхнего слоя, зависящего от объёмного прогрева всей толщины плёнки и толщи воды, что не может быть зарегистрировано этими устройствами.

В целом обнаружение нефти в ИК-диапазоне не является надёжным, поскольку ИК-радиация может исходить от водорослей или береговой линии, а также сильно подвержена влиянию атмосферы. При этом для решения обратной задачи нужны эмпирические связи между толщиной плёнки и её поглощением, которые, строго говоря, различны для разных нефтепродуктов и сортов нефти. Несмотря на эти трудности, использование ИК-изображений нефтяных разливов с радиометров космического и авиационного базирования крайне востребовано в задачах определения масштабов разливов и прогнозирования динамики их распространения.

Ультрафиолетовый диапазон

В условиях солнечного освещения и при чистой атмосфере узкий ультрафиолетовый (УФ) диапазон длин волн от 320 до 380 нм, соответствующий окну прозрачности атмосферы, также используется для регистрации изображений сликов на морской поверхности (Goodman, 1988). Идентификация слика происходит за счёт увеличения коэффициента отражения

поверхности, покрытой плёнкой, относительно чистой воды, т. е. путём оценки контраста. Такой подход позволяет регистрировать наиболее тонкие плёнки с толщиной от 0,1 до 10 мкм, строить карты пространственного распределения толщины плёнок в относительных единицах по спектральным УФ-изображениям (Grüner et al., 1991), но регулярных алгоритмов восстановления толщины он не содержит. Несмотря на это, отдельные попытки повысить информативность УФ-изображений сликов использованием современной техники всё же встречаются в литературе (например, публикации (Shi et al., 2015; Yin et al., 2009)).

Первые математические модели УФ-изображения, учитывающие метеорологические условия, а также оптические характеристики нефти и воды, были опубликованы в работах (Stewart et al., 1970; Wezernak, Polcyn, 1971). Результаты расчёта показали, что яркость плёнки, как и её видимый за счёт разных коэффициентов отражения нефти и воды контраст, максимальны и слабо меняются в диапазоне толщины от 0,1 до 1 мкм. При толщине плёнки от 1 до 10 мкм и без того небольшой по абсолютным значениям контраст падает в 1,5–2 раза в зависимости от вещества.

Плёнки с рассмотренной толщиной не представляют значительного интереса в задачах оперативного обнаружения и мониторинга катастрофических нефтяных разливов (Fingas, 2012). Вместе с тем, известно, что УФ-изображения, как и инфракрасные, подвержены многим помехам и «ложным срабатываниям». К числу причин этого относятся: области ветровой тени, солнечные блики, водоросли, песок и ракушки на морском дне, а также примеси, вносящие вклад во флуоресценцию и отражательную способность водной толщи (Estes, Senger, 1971). Некоторые из этих помех отличаются от тех, что наблюдаются при инфракрасном зондировании, поэтому на практике используют комбинацию ИК + УФ. С её помощью в отдельных случаях удаётся создать карты распределения толщины нефтяных сликов, несмотря на их невысокую точность.

Поляризационное соотношение

Возможность обнаружения нефтяных плёнок на фоне морской поверхности путём поляризационных гиперспектральных измерений отражательной способности плёнки и воды под разными углами была рассмотрена в ряде работ (например, публикации (Millard, Arvesen, 1973; Wang et al., 2009; Zhao et al., 2006; Zwick et al., 1981)). В недавнем исследовании (Sun et al., 2011) авторы показали, что при квазивертикальном зондировании поляризационные отношения (ПО) для нефтяных плёнок на фоне морской воды малы по абсолютным значениям, но существенно различимы для разных сортов нефти и толщины плёнок в ближнем ИК-диапазоне (*рис. 4*).

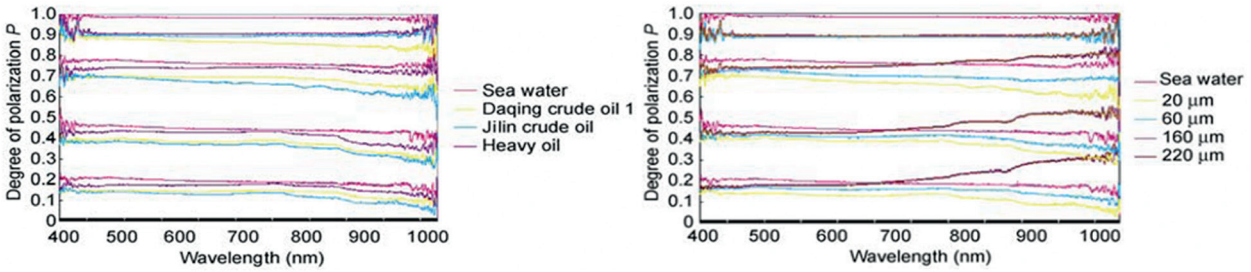

Рис. 4. Результаты измерений поляризационного отношения воды и плёнок разных сортов нефти (*слева*) и толщины (*справа*). Наборы кривых соответствуют углам визирования: 20°, 30, 40 и 50° (снизу вверх) (Sun et al., 2011)

Одновременно с этим в спектрах ПО обнаружены два минимума на длинах волн 785 и 880 нм, величины которых зависят от толщины плёнки (наличие минимумов авторы связывают с собственными свойствами нефти). С увеличением угла зондирования до 50° (угол Брюстера) ПО растёт, приближаясь к единице в обоих диапазонах спектра, независимо

от типа нефти и толщины плёнки. В качестве практического результата авторы предложили различать плёнки на воде по разнице их ПО при углах 20–30°, а оценку толщины плёнок проводить по величинам спектральных минимумов на длинах волн 785 и 880 нм, отмечая возможность возникновения сложностей в связи с разнообразием сортов нефти и, как следствие, с формой спектральных кривых ПО. Более поздних практически значимых результатов применения предложенного метода в литературе найти не удалось.

Лазерное зондирование

Помимо рассмотренных выше оптических методов дистанционной оценки толщины плёнок, относящихся к пассивным методам, широкое распространение сегодня имеют и способы активной локации водной поверхности, построенные на базе лазерных систем. Среди них можно выделить целый ряд подходов к оценке толщины плёнок. Первый подобен использованию тепловых изображений для оценки контрастов нефтяной плёнки на фоне воды (см. п. «Дальний ИК-диапазон») с той лишь разницей, что вместо Солнца используется искусственный источник излучения, а именно CO_2-лазер, размещённый на борту самолёта (Богородский, Кропоткин, 1975; Шифрин и др., 1978). Второй, наиболее распространённый сегодня, использует эффект ослабления сигнала комбинационного рассеяния (КР) воды при наличии на её поверхности тонкой плёнки (лазерная спектроскопия). Третий подход основан на детектировании малых поверхностных возмущений плёнки, вызванных отражённой от её нижней границы акустической волной, индуцированной мощным лазерным излучением на верхней (внешней) границе плёнки (лазерная ультразвуковая диагностика). Четвёртый метод базируется на эффекте генерации звука в воде или воздухе при облучении плёнки на водной поверхности лазерным излучением (оптоакустический метод). Ключевые моменты первого подхода изложены выше, а детали трёх других — ниже.

В лабораторных условиях применимы и другие методы, например измерение коэффициента пропускания света через плёнки разной толщины (Cheemalapati et al., 2017; Molkov et al., 2019b). Хотя этот метод прост и понятен физически, восстанавливаемые значения толщины, как правило, сильно флуктуируют в силу наличия целого ряда факторов, основным из которых является неоднородность толщины плёнки. В натурных же условиях к ним добавляются изменчивость наклона поверхности и толщины слоя жидкости под действием волнения, влияние гидрооптических характеристик воды и др., что значительно затрудняет адаптацию предложенного метода.

Лазерная спектроскопия

Регистрация и анализ спектров флуоресценции воды, индуцированной лазерным излучением УФ-диапазона, является традиционным подходом для решения множества океанологических задач. Так, в работе (Hoge, Swift, 1980) впервые было предложено оценивать толщину тонких нефтяных плёнок на морской поверхности по ослаблению интенсивности комбинационного рассеяния света в воде. При наличии на поверхности воды тонкой плёнки часть излучения поглощается нефтью, в результате чего регистрируемый сигнал КР ослабевает, причём тем интенсивнее, чем толще плёнка. В случае толстой плёнки сигнал КР исчезает. В своей работе авторы предложили формулу для оценки толщины плёнки по сигналу КР при условии, что заранее известны показатели поглощения нефти и воды на длинах волн излучения и КР. Существуют и другие сложности: изменение длины оптического пути света в воде, вызванное частичным его поглощением в плёнке; влияние флуоресценции нефти и окрашенного растворённого в воде органического вещества; зависимость от первичных гидрооптических характеристик воды и параметров волнения вдоль трассы зондирования и т. д. Несмотря на это, предложенный метод имеет не только широкое распространение, но и продолжает активно развиваться в связи с появлением новых оригинальных лидаров (Babichenko, 2008; Karpicz et al., 2006; Li et al., 2010; Utkin et al., 2011).

Лазерный ультразвуковой метод

Лазерный ультразвуковой метод базируется на идее теплового возбуждения мощным ИК-лазером звуковой волны, распространяющейся вглубь толстой плёнки до её нижней границы, где происходит её частичное отражение и последующее распространение в обратном направлении (Aussel, Monchalin, 1989). При достижении верхней границы плёнки звуковая волна создаёт локальное возмущение, регистрируемое вторым лазером, совмещённым с интерферометром Фабри – Перо. В американской системе LURSOT (Laser Ultrasonic Remote Sensing of Oil Thickness) (Choquet et al., 1993) есть и третий лазер, работающий как триггер для включения системы излучения и регистрации отражённого сигнала при наличии оптимального уклона поверхности. Точность такого метода зависит от точности измерения времени прихода эхо-сигнала и скорости распространения звука в плёнке, которая может быть измерена лишь в независимом лабораторном эксперименте или взята из справочника, если известен сам нефтепродукт. Апробация этого метода была выполнена в лабораторном эксперименте для толщины плёнки от 250 мкм до 35 мм, в том числе и при наличии волнения, а также в натурных условиях с борта самолёта. Точность оценки толщины плёнки по разным данным составила от 1 до 50 % . При этом, однако, предложенная система LURSOT оказалась не только дорогой, но и мало подходящей для размещения на авианосителях ввиду необходимости применения большой приёмной антенны. В результате рассмотренный подход не получил дальнейшего развития, хотя в литературе встречаются редкие публикации в продолжение этого метода. Так, в работе (Li et al., 2017) авторы провели лабораторный эксперимент, в котором использовали импульсный лазер с длиной волны 355 нм для генерации ультразвука и сканирующий лазерный доплеровский виброметр (Laser Doppler Vibrometer — LDV) для регистрации амплитуды и частоты акустических сигналов на поверхности плёнки по её возмущениям. Оценка толщины плёнки проводилась на основе расчёта времени задержки акустического импульса при условии, что скорость звука в образце известна.

Оптоакустический метод

Эффект генерации звука в среде, облучаемой мощным ИК-излучением, широко применяется в дефектоскопии и медицине при диагностике мягких тканей. Применительно к плёнкам на воде подобные исследования тоже проводились, хотя и не получили практического результата (Ахманов, Руденко, 1975; Егерев и др., 1979; Есипов, 1977; Карабутов и др., 1979). В настоящее время появилось понимание, что наличие плёнки существенно меняет условия формирования областей локального нагрева в воде и, соответственно, излучения акустических волн. Так, в работе (Molkov et al., 2019a) в рамках лабораторного эксперимента впервые продемонстрирован эффект генерации в воздухе акустических импульсов, напоминающих треск, воспринимаемый на слух, при облучении плёнки на поверхности воды непрерывным лазерным излучением с длиной волны 10,4 мкм. Под воздействием ИК-излучения происходит резкий нагрев локализованного объёма воды в тонком слое под плёнкой, сопровождаемый вскипанием воды. Далее поведение нагретой воды зависит от соотношения между эффектами конвективного растекания и термокапиллярными эффектами, определяемыми силами поверхностного натяжения, связанными с горизонтальным градиентом коэффициента поверхностного натяжения (КПН) в условиях неоднородного распределения температуры. Поскольку КПН падает с ростом температуры, то вода растекается из области с высокой температурой в область с низкой, замещаясь холодной водой из нижних слоёв — устанавливается квазистационарный режим циркуляции воды, при котором поверхностная плёнка замедляет растекание воды из-за силы трения в пограничном слое. В момент, когда сила трения превосходит поверхностное натяжение, плёнка рвётся и происходит высвобождение воздушных пузырей, сопровождаемое их лопанием и возникновением треска. После разрушения плёнки нагретая вода быстро охлаждается за счёт испарения, поверхностные расходящиеся течения ослабевают и плёнка восстанавливается. Затем процесс повторяется. В противоположность

этому, если поверхность воды чистая, перегрева воды не происходит, так как в отсутствие трения тепло успевает отводиться за счёт диффузии. Описанный эффект зарегистрирован для разных веществ: нефти, дизеля, олеиновой кислоты. Несмотря на то, что в деталях эффект изучен пока недостаточно, можно утверждать, что частота следования акустических импульсов зависит от температуры воды и воздуха, концентрации поверхностно-активных веществ на водной поверхности (толщины плёнки), мощности лазера, а также ряда других факторов и, возможно, имеет значительные перспективы в решении проблемы определения характеристик плёнки.

Иной механизм генерации звука, а именно ультразвука в толще воды, вызванного облучением плёнки импульсным лазером видимого диапазона (532 нм), представлен в работе (Subochev et al., 2019). В лабораторном эксперименте авторы регистрировали ультразвук с помощью сверхширокополосного ультразвукового гидрофона, изготовленного из поливинилиденфторида и расположенного на дне кюветы глубиной 10 мм и диаметром 93 мм. Плёнка наносилась на поверхность воды с использованием специально изготовленного генератора капель, обеспечивающего капельную подачу с частотой четыре капли в минуту, обусловленной необходимостью однородного растекания нефти по водной поверхности. Принимая однородное поверхностное распределение нефти, эффективный прирост её толщины в кювете оценивался как 1,5 мкм на каплю (вес капли составлял 9 мг). Эксперимент проводился для сырой нефти сорта Urals (ПАО «Лукойл», Россия) с известной скоростью звука, необходимой для расчёта толщины плёнки по длительности оптоакустического импульса. На её примере авторы продемонстрировали возможность оценки толщины плёнок в широком диапазоне значений (от 10 до 600 мкм) с погрешностью не более 5 %.

Радиолокационные методы

Радиометрия

В радиоволновой области электромагнитного излучения с миллиметровым и сантиметровым диапазонами длин волн при пассивном наблюдении предпринимались попытки установить связь измеряемой радиояркостной температуры с толщиной плёнки нефти на морской поверхности в натурных условиях. В работе (Hollinger, Mennella, 1973) на основе данных многочастотного микроволнового авиационного радиометра, работавшего на частотах 19,4; 31 и 69,8 ГГц, показано, что при наблюдении восьми морских разливов нефти во всех случаях более 90 % объёма нефти находилось в менее 10 % площади видимого разлива. В публикации (Blume et al., 1983) рассмотрены результаты натурных экспериментов с микроволновым радиометром, работавшим на частоте 1,43 ГГц, где было продемонстрировано возрастание температуры на несколько градусов Кельвина над толстой нефтяной плёнкой (по оценкам, порядка 1 см), которое описывалось в рамках слоистой диэлектрической среды (нефть на воде). При этом над тонкой мономолекулярной плёнкой олеинового спирта было зарегистрировано падение яркостной температуры на 50–60 К, интерпретация эффекта была основана на гипотезе о формировании упорядоченной (кластерной) структуры молекул воды под плёнкой, обусловливающей сильное изменение диэлектрической постоянной на рассматриваемой частоте. К сожалению, какие-либо последующие сообщения о подтверждении этого эффекта в литературе отсутствуют.

Для микроволновых радиометров существуют описанные выше для ИК-диапазона проблемы и ограничения. Частично они снимаются с помощью калибровки в начале каждого эксперимента, привлечения нескольких частотных диапазонов, а также использования двух ортогональных поляризаций (Pelyushenko, 1995). В патенте (Бирульчик и др., 2004) описывается устройство на основе многочастотного радиометра для идентификации разливов нефти и определения толщины плёнки. В работе (Pelyushenko, 1995) показано, что радиотепловое излучение слоя нефти на водной поверхности имеет квазипериодический характер, поэтому при измерении на одной частоте для толщины, большей $\lambda/4\cdot\sqrt{\varepsilon}$, имеет место неоднозначность в определении измеренной величины (λ — длина волны; ε — диэлектрическая проницаемость

нефти). Для устранения этого эффекта при построении измерителя применяется двухчастотный способ определения толщины, в котором выбранные частоты не кратны друг другу $(\lambda_1 < \lambda_2)$. При графоаналитической обработке используются две расчётные квазипериодические функции отношения излучательной способности с некратными периодами, в результате чего при каждом измерении в диапазоне толщины порядка $\lambda_2/4\cdot\sqrt{\varepsilon}$ существует пара значений, однозначно определяющая измеренную толщину слоя. Предлагаемый измеритель работает на частотах 34 и 12,2 ГГц.

Радиолокация

Не менее важное место среди методов диагностики морских загрязнений занимают методы активной радиолокации в сверхвысокочастотном диапазоне зондирующих радиоволн. Проявление плёнок ПАВ в радиолокационном (РЛ) сигнале связано в основном с его изменением вследствие гашения коротких ветровых волн плёнками (контрастом). Для наблюдений, отличных от надирных, контраст будет существенно зависеть от диапазона длин радиоволн, типа вещества и толщины плёнки, а также скорости ветра. Для тонких мономолекулярных плёнок ПАВ вопрос о гашении коротких ветровых волн в настоящее время в существенной степени исследован (см., например, библиографию, представленную в работах (Ермаков, 2010; Лаврова и др., 2011)). В то же время вопрос о подавлении волнения относительно толстыми плёнками нефтепродуктов остаётся практически открытым. Это связано с тем, что последние характеризуются большим числом параметров: поверхностными и межфазными коэффициентами поверхностного натяжения, вязкостью и упругостью. Теоретический анализ, выполненный в публикации (Jenkins, Jacobs, 1997), показал существенное влияние указанных параметров на затухание ветровых волн и поставил вопрос, каковы эти параметры для реальных нефтяных плёнок. Экспериментальные исследования затухания гравитационно-капиллярных волн на нефтяных плёнках были проведены в работах (Ермаков и др., 2007; Linde et al., 1986), а в статье (Ермаков и др., 2006) на основе численных расчётов и сравнения с результатами измерений были даны оценки вязкоупругих характеристик нефтяных плёнок. Эти оценки явились фактически первой попыткой восстановления характеристик нефтяных плёнок. Вообще говоря, измерение физических характеристик плёнок в лабораторных условиях (толщины, коэффициента поверхностного натяжения, упругости) является достаточно сложной задачей. Особенно это касается измерения динамических характеристик плёнок для оценки воздействия последних на затухание поверхностных волн. В этом контексте следует упомянуть метод осциллирующего воздушного пузырька (Zholkovskij et al., 2000) либо метод гравитационно-капиллярных волн (см., например, работу (Scott, Thomas, 1999)). Сравнительно недавно был развит метод параметрических волн, позволяющий на основе оригинальных измерений коэффициента затухания и длины поверхностных волн восстанавливать динамическую упругость и коэффициент поверхностного натяжения (Ермаков, 2010). Данный метод был успешно использован для восстановления свойств мономолекулярных плёнок целого ряда поверхностно-активных веществ, а сравнительно недавно — для определения эффективных коэффициентов поверхностного натяжения и упругости нефтяных плёнок (Sergievskaya et al., 2019). Несмотря на прогресс в использовании упомянутых лабораторных методов, по-прежнему актуальной остаётся задача развития новых подходов к исследованию характеристик плёнок на поверхности моря и внутренних водоёмов, отвечающих требованиям оперативности и простоты выполнения в натурных условиях.

Отметим, что в последние годы проведены натурные эксперименты по РЛ-зондированию нефтяных плёнок (Migliaccio et al., 2015; Skrunes et al., 2012), показавшие различия в характере подавления РЛ-сигнала разными типами нефтяных плёнок, однако недостатком этих работ стало то, что физические характеристики используемых в экспериментах плёнок не исследовались количественно. Сравнительно недавно в ходе натурных исследований были также получены первые данные о характеристиках биогенных плёнок в зонах цветения воды,

а также оценена эффективная вязкость воды в присутствии фитопланктона, проведены первые наблюдения подавления интенсивности РЛ-сигнала в зонах цветения (Ермаков и др., 2013). В работе (Ермаков и др., 2003) было установлено изменение доплеровских сдвигов РЛ-сигналов Ka- и X-диапазонов при наличии мономолекулярных плёнок. Величина изменения доплеровского сдвига зависит от упругости плёнки, скорости ветра и длины радиоволн. Совместный анализ двух независимо измеряемых параметров радиолокационного рассеяния — эффективной площади рассеяния (ЭПР) и доплеровской скорости — позволяет расширить возможности определения характеристик плёнок ПАВ на морской поверхности (Ermoshkin et al., 2019).

В работе (Hammoud et al., 2019) предложен вероятностный подход для анализа данных широкополосного радиолокатора при надирном зондировании разливов нефти на морской поверхности. Была рассмотрена теоретическая зависимость отражательной способности морской поверхности от толщины нефтяной плёнки на частотах 4–12 ГГц. Расчёты коэффициентов отражения проводились для случаев трёхслойной среды (воздух, нефть, морская вода), что позволило рассмотреть интерференционные эффекты при заданной шероховатости. Совместный вероятностный анализ модельных результатов зондирования на трёх выбранных частотах позволил получить теоретические значения вероятности определения плёнок на гладкой и шероховатой поверхностях для различной толщины плёнок. Однако в работе не была рассмотрена задача о подавлении ветровых волн плёнками. Для этого требуются как дальнейшие исследования характеристик различных плёнок, так и проведение специальных экспериментов по дистанционному (в первую очередь — радиолокационному) зондированию плёнок с известными характеристиками.

Заключение

Согласно представленным в работе материалам, визуальное наблюдение эффективно для детектирования самых тонких плёнок толщиной менее 1 мкм по их радужному проявлению, все другие наблюдаемые оттенки субъективны и могут быть восприняты неоднозначно (например, серебристый и металлический блеск). Спектры яркости поверхности в видимом диапазоне не имеют регулярных спектральных особенностей. Зато таковые, соответствующие связям «углерод – водород», есть в изображениях нефтяных плёнок и эмульсий в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Они чувствительны к толщине плёнки и слою эмульсии, а также к концентрации эмульсии, на чём и построен метод картирования нефтяного разлива в относительных единицах. Перевод толщины в абсолютные единицы возможен при реализации сопутствующих лабораторных измерений с отобранными в море образцами плёнок нефтепродуктов. Согласно представленным в обзоре статьям, такой подход позволяет получать оценки толщины плёнок в широком диапазоне — от микрон до десятков миллиметров, что делает этот метод одним из самых оперативных и информативных при детектировании и мониторинге крупных утечек нефти с помощью средств авиационного или космического базирования. Определённые надежды возложены на радиолокационные методы как всепогодные инструменты диагностики морской поверхности. Однако их результативность возрастает только в случае использования многочастотной радиолокации, при этом соответствующие приборы пока представлены единичными образцами. При использовании лёгкой авиации и флота обнадёживающие результаты могли бы быть достигнуты с применением лазерной техники, а также её комбинации с акустическими системами.

В целом представленные в обзоре методы подтверждают актуальность проблемы дистанционного определения толщины плёнок на морской поверхности и подчёркивают регулярный интерес к ней на протяжении многих десятилетий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-20054) и средств темы государственного задания в сфере науки (№ 0729-2020-0037).

Литература

1. *Ахманов С. А.*, *Руденко О. В.* Параметрический лазерный излучатель ультразвука // Журн. техн. физики. 1975. Т. 1. № 15. С. 725–728.
2. *Бирульчик В. П.*, *Пелюшенко С. А.*, *Советкин М. Ю.*, *Чирков В. В.*, *Шавин П. Б.* Измеритель толщины слоя нефти, разлитой на водной поверхности. Патент РФ 2227897. Рег. 27.04.2004.
3. *Богородский В. В.*, *Кропоткин М. А.* Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений вод ИК-лазером. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 40 с.
4. *Гуревич И. Я.*, *Шифрин К. С.* Отражение видимого и ИК-излучения нефтяными пленками на море // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 166–176.
5. *Егерев С. В.*, *Есипов И. Б.*, *Лямшев Л. М.*, *Наугольных К. А.* Генерация звука длинными лазерными импульсами // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 2. С. 220–226.
6. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 165 с.
7. *Ермаков С. А.*, *Сергиевская И. А.*, *Зуйкова Э. М.*, *Кияшко С. В.*, *Щегольков Ю. Б.* Об эффекте доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // Докл. Акад. наук. 2003. Т. 388. № 1. С. 109–112.
8. *Ермаков С. А.*, *Сергиевская И. А.*, *Гущин Л. А.* Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 86–98.
9. *Ермаков С. А.*, *Сергиевская И. А.*, *Гущин Л. А.*, *Щегольков Ю. Б.* Радиолокационное зондирование органических и нефтяных пленок на морской поверхности // Проявления глубинных процессов на морской поверхности. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 66–81.
10. *Ермаков С. А.*, *Капустин И. А.*, *Лазарева Т. Н.*, *Сергиевская И. А.*, *Андриянова Н. В.* О возможностях радиолокационной диагностики зон эвтрофирования водоемов // Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 336.
11. *Есипов И. Б.* Излучение звука движущим со сверхзвуковой скоростью тепловым источником // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 1. С. 155.
12. *Карабутов А. А.*, *Лапшин Е. А.*, *Панасенко Г. П.*, *Руденко О. В.* Генерация мощных звуковых импульсов при лазерном нагреве поверхности // Вычислительные методы и программирование. М.: Изд-во МГУ, 1979. Т. 31. С. 174–183.
13. *Лаврова О. Ю.*, *Костяной А. Г.*, *Лебедев С. А.*, *Митягина М. И.*, *Гинзбург А. И.*, *Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
14. *Шифрин К. С.*, *Осадчий В. Ю.*, *Беляков Г. К.*, *Гуревич И. Я.*, *Пороховник В. А.*, *Лимин А. А.* Индикация нефтяных пленок на море с помощью лидара на CO2 // 5-й Всесоюз. симп. по лазерному и акуст. зондированию атмосферы: тез. докл. 1978. Т. 1. С. 155–159.
15. *Aussel J. D.*, *Monchalin J. P.* Laser-ultrasonic measurement of oil thickness on water from aircraft, Feasibility Study: Industrial Materials Research Institute Report. 1989.
16. *Babichenko S.* Laser remote sensing of the European marine environment: LIF technology and applications // Remote Sensing of the European Seas. Dordrecht: Springer, 2008. P. 189–204.
17. *Blume H. J. C.*, *Huhnerfuss H.*, *Alpers W.* Variation of the microwave brightness temperature of sea surfaces covered with mineral and monomolecular oil films // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1983. No. 3. P. 295–300.
18. Bonn Agreement: Aerial Surveillance Handbook. Expanded edition produced and renamed as the Aerial Operations Handbook. 2008. 65 p.
19. *Brown C. E.* Laser fluorosensors // Oil spill science and technology. 2011. P. 171–184.
20. *Brown C. E.*, *Fingas M. F.* Development of airborne oil thickness measurements // Marine Pollution Bull. 2003. V. 47. No. 9–12. P. 485–492.
21. *Brown C. E.*, *Fingas M. F.*, *Goodman R. H.*, *Choquet M.*, *Blouin A.*, *Drolet D.*, *Monchalin J.-P.*, *Hardwick C. D.* The LURSOT sensor: providing absolute measurement of oil slick thickness // Proc. 4th Thematic Intern. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. V. 1. Ann Arbor, U. S.: Environmental Research Institute of Michigan, 1997. P. 393.
22. *Brown H. M.*, *Baschuk J. J.*, *Goodman R. H.* Infrared sensing and the measurement of oil slick thickness // Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Canada: Ministry of supply and services, 1998. V. 2. P. 805–810.
23. *Byfield V.* Optical remote sensing of oil in the marine environment: Doctoral Thesis. University of Southampton, 1998. 302 p.
24. *Cheemalapati S.*, *Forth H. P.*, *Wang H.*, *Konnaiyan K. R.*, *Morris J. M.*, *Pyayt A. L.* Measurement of thickness of highly inhomogeneous crude oil slicks // Applied Optics. 2017. V. 56. No. 11. P. E72–E76.

25. *Choquet M.*, *Heon R.*, *Vaudreuil G.*, *Monchalin J.-P.*, *Padioleau C.*, *Goodman R. H.* Remote thickness measurement of oil slicks on water by laser-ultrasonics // Intern. Oil Spill Conf. American Petroleum Institute. 1993. V. 1993. No. 1. P. 531–536.
26. *Clark R. N.*, *Swayze G. A.*, *Leifer I.*, *Livo K. E.*, *Lundeem S. A.*, *Eastwood M.*, *Green R. O.*, *Kokaly R.*, *Hoefen T.*, *Sarture Ch.*, *McCubbin I.*, *Roberts D.*, *Steele D.*, *Ryan T.*, *Dominguez R.*, *Pearson N.* A Method for Qualitative Mapping of Thick Oil Using Imaging Spectroscopy: U. S. Geological Survey. Reston, Virginia, 2010. 54 p.
27. *Davies L.*, *Lunel T.*, *Boxall S.*, *Shimwell S.*, *Byfield V.*, *Gommenginger C.*, *Gurney C.* Review of Sea Empress aerial/satellite images and optimization of procedures and interpretation: Report for the Sea Empress Environmental Evaluation Committee (SEEEC). AEA Technology Limited. AEAT-1476. October, 1997. 52 p.
28. *Ermoshkin A. V.*, *Molkov A. A.*, *Kapustin I. A.* Statistical characteristics of Doppler velocity shift in artificial slick on sea surface // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2019. V. 11150. P. 111501L.
29. *Estes J. E.*, *Senger L. W.* The multispectral concept as applied to marine oil spills // Remote Sensing of Environment. 1971. V. 2. P. 141–163.
30. *Fingas M.* How to measure slick thickness (or not) // Proc. 35th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. 2012. P. 617–652.
31. *Fingas M.* The challenges of remotely measuring oil slick thickness // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 2. P. 319.
32. *Foudan M. F. S.* Hyperspectral remote sensing: a new approach for oil spill detection and analysis: Doctoral Thesis. U. S.: George Mason University, 2003. 154 p.
33. *Goodman R. H.* Simple remote sensing system for the detection of oil on water. Environmental Studies Research Funds. Report No. 098. Calgary, Alberta, Canada: Esso Resources Canada Ltd, Research Department, 1988. 39 p.
34. *Goodman R. H.* Application of the technology in North America // The remote sensing of oil slicks / ed. Lodge A. E. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1989. P. 39–65.
35. *Grüner K.*, *Reuter R.*, *Smid H.* A new sensor system for airborne measurements of maritime pollution and of hydrographic parameters // GeoJournal. 1991. V. 24. No. 1. P. 103–117.
36. *Hammoud F. N.*, *Faour G.*, *Ayad H.*, *Jomaah J.* Bayesian statistics of wide-band radar reflections for oil spill detection on rough ocean surface // J. Marine Science and Engineering. 2019. V. 7. No. 12.
37. *Hoge F. E.*, *Swift R. N.* Oil film thickness measurement using airborne laser-induced water Raman backscatter // Applied Optics. 1980. V. 19. No. 19. P. 3269–3281.
38. *Hollinger J. P.*, *Mennella R. A.* Oil spills: Measurements of their distributions and volumes by multifrequency microwave radiometry // Science. 1973. V. 181. No. 4094. P. 54–56.
39. *Hornstein B. A.* The Appearance and Visibility of Thin Oil Films on Water / Edison Water Quality Research Lab.; Invironmental Protection Technology Agency. Technology Series Report EPA-R2-72-039. Cincinnati, OH, 1972. 95 p.
40. *Hua U.* Remote sensing of oil spills in thermal infrared-Contour line effect // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1991. V. 3. P. 1315–1317.
41. *Hurford N.* Review of remote sensing technology // The Remote Sensing of Oil Slicks: Proc. Intern. Meeting. L.: Institute of Petroleum, 1989. P. 7–16.
42. *Jenkins A. D.*, *Jacobs S. J.* Wave damping by a thin layer of viscous fluid // Physics of Fluids. 1997. V. 9. No. 5. P. 1256–1264.
43. *Jha M. N.*, *Levy J.*, *Gao Y.* Advances in remote sensing for oil spill disaster management: state-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance // Sensors. 2008. V. 8. No. 1. P. 236–255.
44. *Karpicz R.*, *Dementjev A.*, *Kuprionis Z.*, *Pakalnis S.*, *Westphal R.*, *Reuter R.*, *Gulbinas V.* Oil spill fluorosensing lidar for inclined onshore or shipboard operation // Applied Optics. 2006. V. 45. No. 25. P. 6620–6625.
45. *Kordyban E.*, *Cuker S.* Instrumentation to measure the oil thickness on wavy water surface // Review of Scientific Instruments. 1978. V. 49. No. 11. P. 1574–1578.
46. *Leifer I.*, *Lehr W. J.*, *Simecek-Beatty D.*, *Bradley E.*, *Clark R.*, *Dennison P.*, *Wozencraft J.* State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 124. P. 185–209.
47. *Lennon M.*, *Babichenko S.*, *Thomas N.*, *Mariette V.*, *Mercier G.*, *Lisin A.* Detection and mapping of oil slicks in the sea by combined use of hyperspectral imagery and laser induced fluorescence // EARSeL eProceedings. 2006. V. 5. No. 1. P. 120–128.
48. *Levin I. M.* Spectral contrast of oil films on the sea surface: influence of water type, wind velocity, and solar altitude // Ocean Optics XII: Proc. SPIE. V. 2258. 1994. P. 759–769.
49. *Li X. L.*, *Zhao C. F.*, *Qi M. J.*, *Ma Y. J.*, *Li Z. G.*, *Liu Z. S.* The experiment of multi-channel oceanographic laser remote sensing of oil spills system at high platform // Periodical of Ocean University of China. 2010. V. 40. No. 8. P. 145–150.

50. *Li Y.*, *Qi X.*, *Wang H.* Experimental Study on Thickness Measuring Method of Oil-on-Water Using Laser-Ultrasonic Technique // Nanotechnology and Precision Engineering. 2017. V. 15. P. 159–167.
51. *Linde B.*, *Pogorzelski S.*, *Sliwinski A.* The effect of thickness of crude oil layers on the attenuation of the surface capillary wave // Oceanologia. 1986. V. 24. P. 41–46.
52. Manual on Disposal of Refinery Wastes. Volume on Liquid Wastes. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 1969.
53. *Massaro A.*, *Lay-Ekuakille A.*, *Caratelli D.*, *Palamara I.*, *Morabito F. C.* Optical performance evaluation of oil spill detection methods: Thickness and extent // IEEE Trans. Instrumentation and Measurement. 2012. V. 61. No. 12. P. 3332–3339.
54. *Migliaccio M.*, *Nunziataa F.*, *Buonoa A.* SAR polarimetry for sea oil slick observation // Intern. J. Remote Sensing. 2015. V. 36. No. 12. C. 3243–3273.
55. *Millard J. P.*, *Arvesen J. C.* Polarization: A Key to an Airborne Optical System for the Detection of Oil on Water // Science. 1973. V. 180. No. 4091. P. 1170–1171.
56. *Molkov A. A.*, *Kapustin I. A.*, *Ermakov S. A.*, *Lazareva T. N.*, *Leshchev G. V.*, *Sergievskaya I. A.* (2019a) An effect of sound generation due to surfactant films on the water surface illuminated by intensive IR radiation // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2019. V. 11150. P. 111501K.
57. *Molkov A. A.*, *Leshchev G. V.*, *Lazareva T. N.*, *Kapustin I. A.* (2019b) Fluorescence of organic films various origin and thickness to develop a method of their remote sensing on the sea surface: laboratory studies // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2019. V. 11150. P. 111501O.
58. *Monchalin J. P.* Optical detection of ultrasound // IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. 1986. V. 33. P. 485–499.
59. *O'Neil R. A.*, *Neville R. A.*, *Thompson V.* The Arctic and marine oil spill program (AMOP) Remote Sensing Study. Report EPS 4-EC-83-3. Ottawa, Ontario, 1983. 257 p.
60. Open Water Oil Identification Job Aid for Aerial Observation. With Standardized Oil Slick Appearance and Structure Nomenclature and Codes. Version 2. Washington, D. C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012. 54 p.
61. *Pelyushenko S. A.* Microwave radiometer system for the detection of oil slicks // Spill Science and Technology Bull. 1995. V. 2. No. 4. P. 249–254.
62. *Pinel N.*, *Monnier G.*, *Sergievskaya I.*, *Bourlier C.* Simulation of infrared emissivity and reflectivity of oil films on sea surfaces // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2015. V. 9638. P. 963806.
63. *Piskozub J.*, *Drozdowska V.*, *Varlamov V.* A Lidar system for remote measurement of oil film thickness on sea surface // Environments. 1997. V. 17. P. 19.
64. *Salisbury J. W.*, *D'Aria D. M.*, *Sabins F. F.* Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks // Remote Sensing of Environment. 1993. V. 45. No. 2. P. 225–231.
65. *Scott J. C.*, *Thomas N. H.* Sea surface slicks-surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing // Wind-Over-Wave Couplings. Perspectives and Prospects / eds. S. G. Sajjadi, N. H. Thomas, J. C. R. Hunt. Oxford: Clarendon Press, 1999. V. 69. P. 221–229.
66. *Sergievskaya I.*, *Ermakov S.*, *Lazareva T.*, *Guo J.* Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water // Marine Pollution Bull. 2019. V. 146. P. 206–214.
67. *Shi Z.*, *Yu L.*, *Cao D.*, *Wu Q.*, *Yu X.*, *Lin G.* Airborne ultraviolet imaging system for oil slick surveillance: oil-seawater contrast, imaging concept, signal-to-noise ratio, optical design, and optomechanical model // Applied Optics. 2015. V. 54. No. 25. P. 7648–7655.
68. *Shih W. C.*, *Andrews A. B.* Modeling of thickness dependent infrared radiance contrast of native and crude oil covered water surfaces // Optics Express. 2008. V. 16. No. 14. P. 10535–10542.
69. *Skrunes S.*, *Brekke C.*, *Eltoft T.* Oil spill characterization with multi-polarization C-and X-band SAR // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2012. P. 5117–5120.
70. *Stewart S.*, *Spellicy R.*, *Polcyn F.* Analysis of Multispectral Data of the Santa Barbara Oil Slick. Final Report. Willow Run Laboratories University of Michigan. Contract No. USCG 14-08-0001-12082. 1970. 57 p.
71. *Stroop D. V.* Behaviour of Fuel Oil on the Surface of the Sea // Report on Oil-Pollution Experiments. U. S. House of Representatives Committee on River and Harbors. 71st Congress. 2nd Session. Washington, D. C., 1930. P. 41–49.
72. *Subochev P.*, *Belyaev R.*, *Prudnikov M.*, *Vorobyev V.*, *Turchin I.*, *Bugrov A.*, *Pyanova A.*, *Ermoshkin A.*, *Kapustin I.*, *Molkov A.* Underwater optoacoustic detection and characterization of oil films: laboratory study // 20th Intern. Conf. Photoacoustic and Photothermal Phenomena: Book of Abstracts. 2019. BP 026. P. 279.
73. *Sun Z.*, *Zhao Y.*, *Yan G.*, *Li S.* Study on the hyperspectral polarized reflection characteristics of oil slicks on sea surfaces // Chinese Science Bull. 2011. V. 56. No. 15. P. 1596–1602.

74. *Thomas D. P.* Measurements of oil slick thickness using multi-spectral radiometry // IEE Colloq. (Digest). 1983. V. 8. P. 1–12.
75. *Utkin A.*, *Lavrov A.*, *Vilar R.* Evaluation of water pollution by LIF LIDAR // Proc. 31st EARSeL Symp. 2011. V. A2589. p. 28.
76. *Wang Y.*, *Sheng L.*, *Li K.*, *Zhao N.*, *Zhao Y.* Measurement of light polarization characteristics from an oil-polluted soil surface in near-infrared bands // Chinese Science Bull. 2009. V. 54. No. 9. P. 1607–1612.
77. *Wezernak C. T.*, *Polcyn F. C.* Technological Assessment of Remote Sensing Systems for Water Pollution Control / Institute of Science and Technology; University of Michigan; Environmental Protection Agency. Contract No. 16020-FOY. 1971. P. 4-13–4-14.
78. *Wright D. E.*, *Wright J. A.* Evaluation of an infrared oil film monitor: US Coast Guard Report CG-D-51-74 / Department of Transportation. Washington, D. C., 1973.
79. *Yin D. Y.*, *Feng X.*, *Zhang Y.*, *Li X. Y.*, *Huang X. X.*, *Liu B. L.*, *Feng Q.* Research of new-style ultraviolet push-broom imaging technology // Advances in Imaging Detectors and Applications: Intern. Symp. Photoelectronic Detection and Imaging: Proc. SPIE. 2009. V. 7384. P. 738403.
80. *Zhao Y. S.*, *Wu T. X.*, *Luo Y. J.*, *Zhao L. L.*, *Zhou Q. C.* Research on quantitative relation between polarized bidirectional reflectance and bidirectional reflectance of water-surface oil spill // J. Remote Sensing. 2006. V. 10. No. 3. P. 294–298 (in Chinese).
81. *Zholkovskij E. K.*, *Kovalchuk V. I.*, *Fainerman V. B.*, *Loglio G.*, *Krägel J.*, *Miller R.*, *Zholob S. A.*, *Dukhin S. S.* Resonance Behavior of Oscillating Bubbles // J. Colloid and Interface Science. 2000. V. 224. No. 1. P. 47–55.
82. *Zwick H. H.*, *Neville R. A.*, *O'Neil R. A.* A recommended sensor package for the detection and tracking of oil spills // Proc. EARSeL-ESA Symp. ESA SP-167. 1981. P. 77–88.

Remote sensing methods for measuring the thickness of oil/oil product films on the sea surface

A. A. Molkov[1], I. A. Kapustin[1,2], A. V. Ermoshkin[1], S. A. Ermakov[1,2]

[1] *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: a.molkov@inbox.ru

[2] *Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

Surfactant films on the sea surface are an indicator of the processes representing the environmental threat to water bodies and coastal areas. In particular, oil spilling from accidents with oil platforms, tankers and vessel bunkering operations is of great concern. For quantitative assessment of possible damage and development of measures to prevent a catastrophe, it is necessary to get information about the volume of pollutants. It can be estimated through the polluted area and the surface film thickness. Modern tools for the water surface remote sensing allow one to detect surface contaminants, to obtain information about the area of contamination, and to monitor surface pollutions. However, the film thickness estimation with sufficient accuracy is still a problem to be solved. This review describes in detail the capabilities of assessment of film thickness using remote sensing methods and instruments with an indication of their applicability limitations. Contemporary passive and active methods including optical, radio and acoustic ones, as well as their combinations are analyzed. In addition to traditional approaches to the film thicknesses estimation, such as visual observations, spectral reflectance, NIR and thermal imaging, laser fluorescence and laser-ultrasonic sensing, microwave radiometry and radar imaging, the review also provides information on developing new optoacoustic methods which are supposed to be very efficient.

Keywords: sea surface, sea roughness, surfactant film, slicks, oil pollition, oil emulsion, film thickness, visual observation, spectral reflectance, laser fluorescence, laser-ultrasonic, optoacoustic, microwave radiometry, radar

Accepted: 18.04.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27

References

1. Akhmanov S. A., Rudenko O. V., Parametricheskii lazernyi izluchatel' ul'trazvuka (Parametric ultrasound laser emitter), *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1975, Vol. 1, No. 15, pp. 725–728.
2. Birul'chik V. P., Pelyushenko S. A., Sovetkin M. Yu., Chirkov V. V., Shavin P. B., *Izmeritel' tolshchiny sloya nefti*, *razlitoi na vodnoi poverkhnosti* (Thickness gauge for oil spilled on a water surface), Patent RU 2227897, Reg. 27.04.2004.
3. Bogorodskii V. V., Kropotkin M. A., *Distantsionnoe obnaruzhenie neftyanykh zagryaznenii vod IK-lazerom* (Remote detection of oil pollution by IR laser), Leningrad; Gidrometeoizdat, 1975, 40 p.
4. Gurevich I. Ya., Shifrin K. S., Otrazhenie vidimogo i IK-izlucheniya neftyanymi plenkami na more (Reflection of visible and infrared radiation by oil films at sea), *Opticheskie metody izucheniya okeanov i vnutrennikh vodoemov*, Novosibirsk: Nauka, 1979, pp. 166–176.
5. Egerev S. V., Esipov I. B., Lyamshev L. M., Naugolnykh K. A., Generatsiya zvuka dlinnymi lazernymi impul'sami (Sound generation by long laser impulses), *Akusticheskii zhurnal*, 1979, Vol. 25, No. 2, pp. 220–226.
6. Ermakov S. A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (The effect of films on the dynamics of gravitational-capillary waves), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2010, 165 p.
7. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Zuikova E. M., Kiyashko S. V., Shchegolkov Yu. B., Ob effekte izmeneniya doplerovskikh sdvigov chastoty radiolokatsionnykh signalov v prisutstvii organicheskikh plenok na morskoi poverkhnosti (On the effect of changing Doppler frequency shifts of radar signals in the presence of organic films on the sea surface), *Doklady Akademii nauk*, 2003, Vol. 388, No. 1, pp. 109–112.
8. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Gushchin L. A., Plenki na morskoi poverkhnosti i ikh distantsionnoe zondirovanie (Films on the sea surface and their remote sensing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 86–98.
9. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Gushchin L. A., Shchegolkov Yu. B., Radiolokatsionnoe zondirovanie organicheskikh i neftyanykh plenok na morskoi poverkhnosti (Radar sensing of organic and oil films on the sea surface), *Proyavleniya glubinnykh protsessov na morskoi poverkhnosti*, Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2007, pp. 66–81.
10. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaya I. A., Andriyanova N. V., O vozmozhnostyakh radiolokatsionnoi diagnostiki zon evtrofirovaniya vodoemov (On the possibilities of radar diagnostics of zones of eutrophication of water bodies), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 49, No. 3, p. 336.
11. Esipov I. B., Izluchenie zvuka dvizhushchim so sverkhzvukovoi skorost'yu teplovym istochnikom (Sound emission from a heat source moving at a supersonic speed), *Akusticheskii zhurnal*, 1977, Vol. 23, No. 1, p. 155.
12. Karabutov A. A., Lapshin E. A., Panasenko G. P., Rudenko O. V., Generatsiya moshchnykh zvukovykh impul'sov pri lazernom nagreve poverkhnosti (Generation of powerful sound pulses during laser heating of a surface), *Vychislitel'nye metody i progammirovanie*, Moscow: Izd. MGU, 1979, Vol. 31, pp. 174–183.
13. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Integrated satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
14. Shifrin K. S., Osadchii V. Yu., Belyakov G. K., Gurevich I. Ya., Porokhovnik V. A., Limin A. A., Indikatsiya neftyanykh plenok na more s pomoshch'yu lidara na CO_2 (Indication of oil films at sea using a lidar on CO_2), *5-i Vsesoyuznyi simpozium po lazernomu i akusticheckomu zondirovaniyu atmosfery* (5th All-Union Symp. Laser and Acoustic Sensing of the Atmosphere), 1978, Vol. 1, pp. 155–159.
15. Aussel J. D., Monchalin J. P., *Laser-ultrasonic measurement of oil thickness on water from aircraft*, *Feasibility Study*, Industrial Materials Research Institute Report, 1989.
16. Babichenko S., Laser remote sensing of the European marine environment: LIF technology and applications, In: *Remote Sensing of the European Seas*, Dordrecht: Springer, 2008, pp. 189–204.
17. Blume H. J. C., Huhnerfuss H., Alpers W., Variation of the microwave brightness temperature of sea surfaces covered with mineral and monomolecular oil films, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1983, No. 3, pp. 295–300.
18. *Bonn Agreement: Aerial Surveillance Handbook*, Expanded edition produced and renamed as the Aerial Operations Handbook, 2008, 65 p.
19. Brown C. E., Laser fluorosensors, *Oil spill science and technology*, 2011, pp. 171–184.
20. Brown C. E., Fingas M. F., Development of airborne oil thickness measurements, *Marine Pollution Bull.*, 2003, Vol. 47, No. 9–12, pp. 485–492.
21. Brown C. E., Fingas M. F., Goodman R. H., Choquet M., Blouin A., Drolet D., Monchalin J.-P., Hardwick C. D., The LURSOT sensor: providing absolute measurement of oil slick thickness, *Proc. 4th Thematic Intern. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, *Vol. 1*, Ann Arbor, U. S.: Environmental Research Institute of Michigan, 1997, p. 393.

22. Brown H. M., Baschuk J. J., Goodman R. H., Infrared sensing and the measurement of oil slick thickness, *Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Ministry of supply and services, Canada, 1998, Vol. 2, pp. 805–810.
23. Byfield V., *Optical remote sensing of oil in the marine environment: Doctoral Thesis*, University of Southampton, 1998, 302 p.
24. Cheemalapati S., Forth H. P., Wang H., Konnaiyan K. R., Morris J. M., Pyayt A. L., Measurement of thickness of highly inhomogeneous crude oil slicks, *Applied Optics*, 2017, Vol. 56, No. 11, pp. E72–E76.
25. Choquet M., Heon R., Vaudreuil G., Monchalin J.-P., Padioleau C., Goodman R. H., Remote thickness measurement of oil slicks on water by laser-ultrasonics, *Intern. Oil Spill Conf.*, American Petroleum Institute, 1993, Vol. 1993, No. 1, pp. 531–536.
26. Clark R. N., Swayze G. A., Leifer I., Livo K. E., Lundeem S. A., Eastwood M., Green R. O., Kokaly R., Hoefen T., Sarture Ch., McCubbin I., Roberts D., Steele D., Ryan T., Dominguez R., Pearson N., *A Method for Qualitative Mapping of Thick Oil Using Imaging Spectroscopy: U. S. Geological Survey*, Reston, Virginia, 2010, 54 p.
27. Davies L., Lunel T., Boxall S., Shimwell S., Byfield V., Gommenginger C., Gurney C., *Review of Sea Empress aerial/satellite images and optimisation of procedures and interpretation: Report for the Sea Empress Environmental Evaluation Committee* (*SEEEC*), AEA Technology Limited, AEAT-1476, October, 1997, 52 p.
28. Ermoshkin A. V., Molkov A. A., Kapustin I. A., Statistical characteristics of Doppler velocity shift in artificial slick on sea surface, *Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *Coastal Waters*, *and Large Water Regions: Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, p. 111501L.
29. Estes J. E., Senger L. W., The multispectral concept as applied to marine oil spills, *Remote Sensing of Environment*, 1971, Vol. 2, pp. 141–163.
30. Fingas M., How to measure slick thickness (or not), *Proc. 35th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, 2012, pp. 617–652.
31. Fingas M., The challenges of remotely measuring oil slick thickness, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 2, p. 319.
32. Foudan M. F. S., *Hyperspectral remote sensing: a new approach for oil spill detection and analysis: Doctoral Thesis*, George Mason University, 2003, 154 p.
33. Goodman R. H., *Simple remote sensing system for the detection of oil on water*, *Report No. 098*, Calgary, Alberta, Canada: Esso Resources Canada Ltd, Research Department, 1988, 39 p.
34. Goodman R. H., Application of the technology in North America, In: *The remote sensing of oil slicks*, Lodge A. E. (ed.), Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1989, pp. 39–65.
35. Grüner K., Reuter R., Smid H., A new sensor system for airborne measurements of maritime pollution and of hydrographic parameters, *GeoJournal*, 1991, Vol. 24, No. 1, pp. 103–117.
36. Hammoud F. N., Faour G., Ayad H., Jomaah J., Bayesian statistics of wide-band radar reflections for oil spill detection on rough ocean surface, *J. Marine Science and Engineering*, 2019, Vol. 7, No. 12.
37. Hoge F. E., Swift R. N., Oil film thickness measurement using airborne laser-induced water Raman backscatter, *Applied Optics*, 1980, Vol. 19, No. 19, pp. 3269–3281.
38. Hollinger J. P., Mennella R. A., Oil spills: Measurements of their distributions and volumes by multifrequency microwave radiometry, *Science*, 1973, Vol. 181, No. 4094, pp. 54–56.
39. Hornstein B. A., *The Appearance and Visibility of Thin Oil Films on Water*, Edison Water Quality Research Lab.; Invironmental Protection Technology Agency, Technology Series Report EPA-R2-72-039, Cincinnati, OH, 1972, 95 p.
40. Hua U., Remote sensing of oil spills in thermal infrared-Contour line effect, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 1991, Vol. 3, pp. 1315–1317.
41. Hurford N., Review of remote sensing, In: *The Remote Sensing of Oil Slicks: Proc. Intern. Meeting*, London: Institute of Petroleum, 1989, pp. 7–16.
42. Jenkins A. D., Jacobs S. J., Wave damping by a thin layer of viscous fluid, *Physics of Fluids*, 1997, Vol. 9, No. 5, pp. 1256–1264.
43. Jha M. N., Levy J., Gao Y., Advances in remote sensing for oil spill disaster management: state-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance, *Sensors*, 2008, Vol. 8, No. 1, pp. 236–255.
44. Karpicz R., Dementjev A., Kuprionis Z., Pakalnis S., Westphal R., Reuter R., Gulbinas V., Oil spill fluorosensing lidar for inclined onshore or shipboard operation, *Applied Optics*, 2006, Vol. 45, No. 25, pp. 6620–6625.
45. Kordyban E., Cuker S., Instrumentation to measure the oil thickness on wavy water surface, *Review of Scientific Instruments*, 1978, Vol. 49, No. 11, pp. 1574–1578.
46. Leifer I., Lehr W. J., Simecek-Beatty D., Bradley E., Clark R., Dennison P., Wozencraft J., State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 124, pp. 185–209.
47. Lennon M., Babichenko S., Thomas N., Mariette V., Mercier G., Lisin A., Detection and mapping of oil slicks in the sea by combined use of hyperspectral imagery and laser induced fluorescence, *EARSeL eProceedings*, 2006, Vol. 5, No. 1, pp. 120–128.

48. Levin I. M., Spectral contrast of oil films on the sea surface: influence of water type, wind velocity, and solar altitude, *Ocean Optics XII: Proc. SPIE*, Vol. 2258, 1994, pp. 759–769.
49. Li X. L., Zhao C. F., Qi M. J., Ma Y. J., Li Z. G., Liu Z. S., The experiment of multi-channel oceanographic laser remote sensing of oil spills system at high platform, *Periodical of Ocean University of China*, 2010, Vol. 40, No. 8, pp. 145–150.
50. Li Y., Qi X., Wang H., Experimental Study on Thickness Measuring Method of Oil-on-Water Using Laser-Ultrasonic Technique, *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, Vol. 15, pp. 159–167.
51. Linde B., Pogorzelski S., Sliwinski A., The effect of thickness of crude oil layers on the attenuation of the surface capillary wave, *Oceanologia*, 1986, Vol. 24, pp. 41–46.
52. *Manual on Disposal of Refinery Wastes*, *Volume on Liquid Wastes*, Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 1969.
53. Massaro A., Lay-Ekuakille A., Caratelli D., Palamara I., Morabito F. C., Optical performance evaluation of oil spill detection methods: Thickness and extent, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 2012, Vol. 61, No. 12, pp. 3332–3339.
54. Migliaccio M., Nunziataa F., Buonoa A., SAR polarimetry for sea oil slick observation, *Intern. J. Remote Sensing*, 2015, Vol. 36, No. 12, pp. 3243–3273.
55. Millard J. P., Arvesen J. C., Polarization: A Key to an Airborne Optical System for the Detection of Oil on Water, *Science*, 1973, Vol. 180, No. 4091, pp. 1170–1171.
56. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermakov S. A., Lazareva T. N., Leshchev G. V., Sergievskaya I. A. (2019a), An effect of sound generation due to surfactant films on the water surface illuminated by intensive IR radiation, *Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *Coastal Waters*, *and Large Water Regions: Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, p. 111501K.
57. Molkov A. A., Leshchev G. V., Lazareva T. N., Kapustin I. A. (2019b), Fluorescence of organic films various origin and thickness to develop a method of their remote sensing on the sea surface: laboratory studies, *Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *Coastal Waters*, *and Large Water Regions: Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, p. 111501O.
58. Monchalin J. P., Optical detection of ultrasound, *IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1986, Vol. 33, pp. 485–499.
59. O'Neil R. A., Neville R. A., Thompson V., *The Arctic and marine oilspill program* (*AMOP*) *Remote Sensing Study*, *Report EPS 4-EC-83-3*, Ottawa, Ontario, 1983, 257 p.
60. *Open Water Oil Identification Job Aid for Aerial Observation*, *With Standardized Oil Slick Appearance and Structure Nomenclature and Codes*, *Version 2*, Washington, D. C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012, 54 p.
61. Pelyushenko S. A., Microwave radiometer system for the detection of oil slicks, *Spill Science and Technology Bull.*, 1995, Vol. 2, No. 4, pp. 249–254.
62. Pinel N., Monnier G., Sergievskaya I., Bourlier C., Simulation of infrared emissivity and reflectivity of oil films on sea surfaces, *Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *Coastal Waters*, *and Large Water Regions: Proc. SPIE*, 2015, Vol. 9638, p. 963806.
63. Piskozub J., Drozdowska V., Varlamov V., A Lidar system for remote measurement of oil film thickness on sea surface, *Environments*, 1997, Vol. 17, p. 19.
64. Salisbury J. W., D'Aria D. M., Sabins F. F., Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks, *Remote Sensing of Environment*, 1993, Vol. 45, No. 2, pp. 225–231.
65. Scott J. C., Thomas N. H., Sea surface slicks-surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing, In: *Wind-Over-Wave Couplings. Perspectives and Prospects*, S. G. Sajjadi, N. H. Thomas, J. C. R. Hunt (eds.), Oxford: Clarendon Press, 1999, Vol. 69, pp. 221–229.
66. Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Guo J., Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water, *Marine Pollution Bull.*, 2019, Vol. 146, pp. 206–214.
67. Shi Z., Yu L., Cao D., Wu Q., Yu X., Lin G., Airborne ultraviolet imaging system for oil slick surveillance: oil-seawater contrast, imaging concept, signal-to-noise ratio, optical design, and optomechanical model, *Applied Optics*, 2015, Vol. 54, No. 25, pp. 7648–7655.
68. Shih W. C., Andrews A. B., Modeling of thickness dependent infrared radiance contrast of native and crude oil covered water surfaces, *Optics Express*, 2008, Vol. 16, No. 14, pp. 10535–10542.
69. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T., Oil spill characterization with multi-polarization C-and X-band SAR, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2012, pp. 5117–5120.
70. Stewart S., Spellicy R., Polcyn F., *Analysis of Multispectral Data of the Santa Barbara Oil Slick*, Final Report, Willow Run Laboratories University of Michigan, Contract No. USCG 14-08-0001-12082, 1970, 57 p.
71. Stroop D. V., Behaviour of Fuel Oil on the Surface of the Sea, In: *Report on Oil-Pollution Experiments*, U. S. House of Representatives Committee on River and Harbors, 71st Congress, 2nd Session, Washington, D. C., 1930, pp. 41–49.
72. Subochev P., Belyaev R., Prudnikov M., Vorobyev V., Turchin I., Bugrov A., Pyanova A., Ermoshkin A., Kapustin I., Molkov A., Underwater optoacoustic detection and characterization of oil films: laboratory

study, *20th Intern. Conf. Photoacoustic and Photothermal Phenomena*, Book of Abstracts, 2019, No. BP 026, p. 279.
73. Sun Z., Zhao Y., Yan G., Li S., Study on the hyperspectral polarized reflection characteristics of oil slicks on sea surfaces, *Chinese Science Bull.*, 2011, Vol. 56, No. 15, pp. 1596–1602.
74. Thomas D. P., Measurements of oil slick thickness using multi-spectral radiometry, *IEE Colloq.* (*Digest*), 1983, Vol. 8, pp. 1–12.
75. Utkin A., Lavrov A., Vilar R., Evaluation of water pollution by LIF LIDAR, *Proc. 31st EARSeL Symp.*, 2011, Vol. A2589, p. 28.
76. Wang Y., Sheng L., Li K., Zhao N., Zhao Y., Measurement of light polarization characteristics from an oil-polluted soil surface in near-infrared bands, *Chinese Science Bull.*, 2009, Vol. 54, No. 9, pp. 1607–1612.
77. Wezernak C. T., Polcyn F. C., *Technological Assessment of Remote Sensing Systems for Water Pollution Control*, Institute of Science and Technology, University of Michigan, Environmental Protection Agency, Contract No. 16020-FOY, April 30, 1971, pp. 4-13–4-14.
78. Wright D. E., Wright J. A., *Evaluation of an infrared oil film monitor: US Coast Guard Report CG-D-51-74*, Department of Transportation, Washington, D. C., 1973.
79. Yin D. Y., Feng X., Zhang Y., Li X. Y., Huang X. X., Liu B. L., Feng Q., Research of new-style ultra-violet push-broom imaging technology, *Advances in Imaging Detectors and Applications: Intern. Symp. Photoelectronic Detection and Imaging: Proc. SPIE*, 2009, Vol. 7384, p. 738403.
80. Zhao Y. S., Wu T. X., Luo Y. J., Zhao L. L., Zhou Q. C., Research on quantitative relation between polarized bidirectional reflectance and bidirectional reflectance of water-surface oil spill, *J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 10, No. 3, pp. 294–298 (in Chinese).
81. Zholkovskij E. K., Kovalchuk V. I., Fainerman V. B., Loglio G., Krägel J., Miller R., Zholob S. A., Dukhin S. S., Resonance Behavior of Oscillating Bubbles, *J. Colloid and Interface Science*, 2000, Vol. 224, No. 1, pp. 47–55.
82. Zwick H. H., Neville R. A., O'Neil R. A., A recommended sensor package for the detection and tracking of oil spills, *Proc. EARSeL-ESA Symp.*, ESA SP-167, 1981, pp. 77–88.