

О проявлениях биогенных плёнок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водоёма

О. А. Даниличева¹, С. А. Ермаков^{1,2}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: olgadan@ipfran.ru*

² *Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: stas.ermakov@ipfran.ru*

Выполнен анализ имеющихся данных спутниковых мультиспектральных наблюдений эвтрофированного водоёма на примере Горьковского вдхр., в частности в ближнем (NIR — *англ.* near infrared) и коротковолновом (SWIR — *англ.* short wave infrared) инфракрасном диапазоне, в областях интенсивного цветения фитопланктона, а также в разливах поверхностно-активных веществ (ПАВ) на водной поверхности. Для анализа использовались данные, полученные с помощью Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument), а также сопутствующие подспутниковые наблюдения. Проанализированы спектральные контрасты для плёнок различной природы и толщины в видимом и NIR/SWIR-диапазонах. Показано, что биогенные плёнки на поверхности воды в областях интенсивного цветения фитопланктона могут быть достаточно толстыми и проявляться в виде областей плотной «корки», которые характеризуются значительными контрастами на изображениях в NIR- и SWIR-диапазонах. Тонкие биогенные плёнки, которые можно рассматривать как квазимономолекулярные, слабо проявляются в SWIR-диапазоне подобно мономолекулярным плёнкам ПАВ, чьи контрасты во всех диапазонах близки к 1. В NIR-диапазоне контрасты тонких биогенных плёнок более существенны и близки к значениям для немномолекулярных (перенасыщенных) плёнок ПАВ, при этом контрасты последних, в отличие от тонких биогенных плёнок, значительны и в SWIR-диапазоне. Указанные особенности мультиспектральных изображений биогенных плёнок могут быть использованы в качестве дополнительной информации, например при решении задач дистанционной диагностики плёнок, в том числе с использованием микроволновых радиолокаторов.

Ключевые слова: биогенные плёнки, плёнки ПАВ, спутниковые изображения, мультиспектральные данные, Sentinel-2

Одобрена к печати: 14.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284

Введение

Эвтрофикация водоёмов, в частности прибрежных зон океана, озёр и водохранилищ, может приводить к интенсивному, иногда катастрофическому, развитию фитопланктона — «цветению» воды, что вызывает снижение её прозрачности, уменьшение концентрации растворённого кислорода, резкое повышение уровня содержания токсинов в воде и пр. Это приводит к массовой гибели рыбы, нарушению нормальной работы водоочистных сооружений, непригодности использования воды как питьевой. Использование спутниковых систем для диагностики зон цветения является весьма актуальным при развитии методов экологического мониторинга внутренних водоёмов и прибрежных зон океана. Наблюдение зон цветения в оптическом диапазоне основано на анализе вариаций цвета верхнего слоя воды. Следует отметить, что применение оптических спутниковых сканеров ограничено светлым временем суток, а также благоприятными метеоусловиями (отсутствием сильной облачности, тумана, осадков). Цветение может проявляться и на радиолокационных спутниковых изображениях (см., например Qi et al., 2022), что обусловлено наличием биогенных плёнок поверхностно-активных веществ (ПАВ), связанных с жизнедеятельностью фитопланктона и приводящих к подавлению мелкомасштабных ветровых волн — ряби. Биогенные плёнки проявляются на радио-

локационных изображениях (РЛИ) в виде сликов, т. е. областей с пониженной интенсивностью РЛ-сигнала (Ermakov et al., 2013; Lin et al., 2003). Однако подобные области могут быть связаны и со штилевыми зонами, морской слизью или мусором, нефтяными плёнками и пр.

До последнего времени в литературе было распространено утверждение, хотя и не основанное на сколько-либо убедительных измерениях, о том, что биогенные плёнки являются «тонкими» — квазимономолекулярными с толщиной порядка двух-трёх десятков ангстрем (Gade et al., 2006; Hühnerfuss et al., 1984). Однако на основе визуальных наблюдений можно заключить, что в случаях интенсивного (катастрофического) цветения фитопланктона биогенные плёнки могут характеризоваться наличием радужных пятен либо «корки», образующейся из-за скопления клеток планктона, пыли, пыльцы растений и пр., и в этом отношении эти плёнки могут быть схожими, например, с нефтяными разливами, имеющими сравнительно большую толщину порядка 1 мкм и более (Molkov et al., 2019; Qi et al., 2022).

Отметим, что биогенные плёнки в числе прочих причин могут образовываться при наличии пластикового мусора в водной среде, который представляет собой новый субстрат, доступный для колонизации различными микроорганизмами, в том числе диатомовыми водорослями, динофитовыми, цианобактериями и др., и формирующий принципиально новую среду обитания — пластисферу (см., например (Калинина, Сапожников, 2019; Smith et al., 2021; Zettler et al., 2013)). В настоящее время нам не известны исследования характеристик биоплёнок, связанных с микроводорослями — обрастателями пластика, однако можно полагать, что при высоком уровне загрязнения последним эти плёнки также могут характеризоваться как достаточно толстые.

Отметим, что значительное количество работ посвящено экспериментам с искусственными сликами для моделирования эффектов подавления волн и, соответственно, особенностей РЛ-рассеяния (Alpers, Hühnerfuss, 1989; Ermakov et al., 2018; Gade et al., 1998). В этих экспериментах использовались различные жирные спирты, кислоты, эфиры, которые могут входить в состав естественных загрязняющих органических веществ и образовывать плёнки, близкие по свойствам к биогенным и антропогенным ПАВ, в том числе и синтетическим полимерным ПАВ (СПАВ) (Ermakov, Kijashko, 2006; Scott, Thomas, 1999). Эти плёнки, как правило, образуют мономолекулярные слои, однако при значительной концентрации, например в центре разлива ПАВ, формируется так называемая перенасыщенная плёнка, содержащая капли ПАВ, соседствующие с монослоем. В природных условиях такие перенасыщенные плёнки также могут формировать корку из-за пыли и пр.

Таким образом, плёнки на морской поверхности могут иметь самое разное происхождение и характеристики, в том числе толщину.

В работе (Alpers et al., 2017), посвящённой анализу возможностей радиолокационной диагностики плёнок, утверждается, что на данный момент невозможно отличать плёнки биогенного происхождения от плёночных загрязнений антропогенной природы, в частности нефтяных, с помощью только микроволновых радиолокаторов без привлечения измерений в других диапазонах спектра электромагнитных волн. Хотя авторы и предполагают, что различие нефтяных и биогенных плёнок может быть основано на различиях статистических характеристик обратного микроволнового рассеяния из-за переменной толщины нефтяных плёнок и однородности мономолекулярных биогенных плёнок, это не может быть использовано в случаях интенсивного цветения водорослей, где, как отмечено выше, биогенные плёнки имеют толщину, существенно превышающую мономолекулярный слой.

Можно полагать, что существует возможность дополнительно использовать оптические/инфракрасные (ИК) датчики и по спектральным характеристикам отражённого от воды излучения отличать плёнки биогенного происхождения от антропогенных загрязнений, включая нефтяные. Типичные спектры отражения для внутренних водоёмов с доминирующим цветением цианобактерий изучались в целом ряде работ (см., например Gilerson et al., 2010; Hu, 2022; Molkov et al., 2019; O'Reilly et al., 2000). В частности, в исследованиях (Hu, 2022; Molkov et al., 2019) представлены спектры отражения для областей водоёма с концентрациями хлорофилла *a* больше 100 мг/л, которые проявлялись в виде скопления плавающих на поверхности воды микроводорослей. В основном в литературе представлены спектры от 400 до 800 нм, ко-

торые захватывают видимый (380–750 нм) и ближний инфракрасный (NIR — *англ.* near infrared, 750–1000 нм) диапазоны. Выбор данных диапазонов связан с пиком в спектре отражения вблизи 700 нм и корреляцией его величины с концентрацией хлорофилла *a* (Gitelson, 1993). Уровень этой корреляции зависит, вообще говоря, от ряда факторов, включая вклад флуоресценции и поглощения излучения фитопланктоном. Для задач дистанционного зондирования поверхностного слоя воды, в том числе мониторинга толстых биогенных плёнок, представляют интерес и другие диапазоны, которые исследованы слабо, например коротковолновый инфракрасный (SWIR — *англ.* short wave infrared, 1–3 мкм), в частности из-за сильного поглощения излучения водой.

Возможность детектирования нефтяных загрязнений в оптическом и инфракрасном диапазонах обсуждалась в исследованиях (Fingas, Brown, 2014; Kram, Laverman, 2007; Zhao et al., 2014), существует и ряд эффективных методик по определению толщины нефтяных плёнок, в особенности в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах (Мольков и др., 2020). Однако нам не известны работы по изучению проявлений в этих диапазонах плёнок иной природы, включая плёнки ПАВ.

В настоящей работе выполнен анализ имеющихся данных спутниковых мультиспектральных наблюдений водоёмов, в частности в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах, в областях интенсивного цветения фитопланктона, а также перенасыщенных плёнок ПАВ на водной поверхности, выполнен сравнительный анализ спектральных контрастов для таких плёнок в видимом и NIR/SWIR диапазонах, выявлены значительные различия в полученных спектральных контрастах, которые могут использоваться для различения разных типов плёнок.

Мультиспектральные изображения водоёма с использованием MSI спутника Sentinel-2

В работе анализируются спутниковые изображения эвтрофированного водоёма на примере Горьковского вдхр. в период интенсивного цветения фитопланктона в августе–сентябре 2022 г., полученные по данным наблюдений высокого пространственного разрешения (~10–60 м) со спутника Sentinel-2 с мультиспектральным устройством MSI (*англ.* Multispectral Instrument) на борту. Мультиспектральный датчик MSI Sentinel-2 имеет 13 каналов с длиной волн от 443 до 2190 нм и пространственным разрешением данных от 10 до 60 м (<https://sentinel.esa.int/>). Для анализа использовались данные первого уровня обработки. В качестве типичного примера на *рис. 1* приведено изображение южной части акватории водохранилища от 12.09.2022.

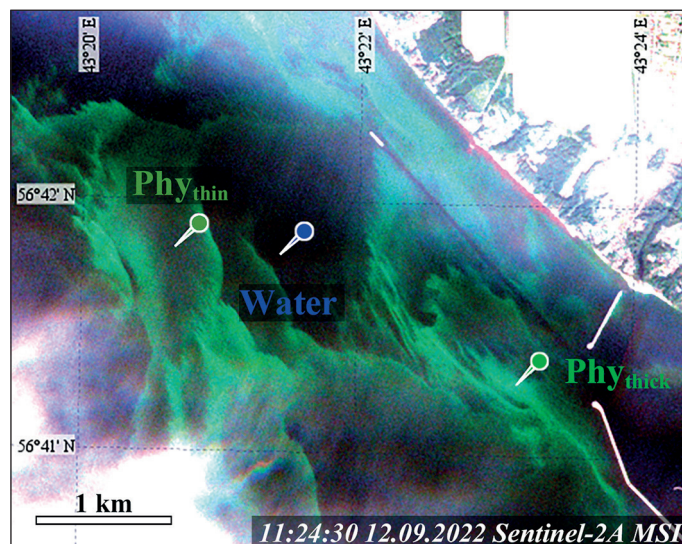


Рис. 1. Пример спутниковой панорамы Sentinel-2A MSI; Горьковское вдхр., 12.09.2022

В водохранилище в рассматриваемый период времени наблюдалось интенсивное цветение фитопланктона, что, в частности, проявилось на изображениях в виде ярких областей зелёного цвета, отвечающих зонам высокой концентрации водорослей. Во время спутниковой съёмки 12.09.2022 проводились подспутниковые наблюдения, включавшие в числе прочих измерения концентрации фитопланктона (цианобактерий) зондом YSI EXO 2 (<https://www.ysi.com/exo2>) на глубине 0,5 м, а также отбор проб поверхностных плёнок с последующим анализом их характеристик методом параметрически возбуждаемых волн (Ермаков, 2010). Подробнее эти подспутниковые наблюдения и полученные результаты, посвящённые в основном сопоставлению изменчивости характеристик радиолокационных сигналов в зонах цветения с характеристиками фитопланктона, описаны в работе (Даниличева и др., 2022) и здесь обсуждаться не будут. Отметим лишь, что наблюдения 12.09.2022 проводились в условиях слабого ветра (1,5–2 м/с), при этом фиксировалась высокая концентрация фитопланктона (в отдельных областях до 20 мг/л) и, соответственно, значительное давление поверхностных плёнок (разности поверхностных натяжений чистой воды и воды с плёнкой) порядка 30 мН/м. Визуально в акватории наблюдались плотные скопления фитопланктона, а плёнка на поверхности водоёма в отдельных областях имела вид плотной корки (см. фото на *рис. 2а*).



Рис. 2. Фотоснимок плёнки с плавающими на поверхности воды водорослями за 12.09.2022, полученный в ходе описанных выше подспутниковых экспериментов (*а*); фотоснимок неоднородной перенасыщенной плёнки ПАВ — олеиновой кислоты — за 18.08.2021, полученный в ходе натуральных экспериментов на Горьковском вдхр. (*б*)

Вариации концентрации фитопланктона находятся в хорошем соответствии с вариациями яркости оптического изображения в зелёной части спектра из-за объёмного рассеяния света из приповерхностных слоёв воды. Важно отметить, что области наиболее сильного цветения проявляются и в усилении сигнала в диапазонах NIR/SWIR (0,8 и 1,6 мкм). Это позво-

ляет полагать, что интенсивное рассеяние ИК-излучения связано с толстыми биогенными плёнками, визуально различимыми благодаря пыли и сгусткам водорослей, которые также вносят вклад в рассеяние. Для проверки этого предположения по спутниковым данным был рассчитан индекс плавающих на поверхности воды водорослей (FAI — *англ.* Floating Algae Index) (Hu, 2009), который является эффективным индексом для обнаружения поверхностной растительности в водоёмах за счёт устранения большей части атмосферных эффектов и который менее чувствителен к аэрозолям и геометрии наблюдений (положения солнца и пр.) по сравнению с аналогичными индексами:

$$FAI = R_{NIR} - [R_{red} + (R_{SWIR} - R_{red}) \cdot (\lambda_{NIR} - \lambda_{red}) / (\lambda_{SWIR} - \lambda_{red})],$$

где R_i — коэффициенты отражения (*англ.* reflectance) соответственно в красном (*англ.* red), коротковолновом (SWIR) и ближнем (NIR) ИК-диапазонах. На *рис. 3* представлена карта распределения FAI в исследуемой акватории.

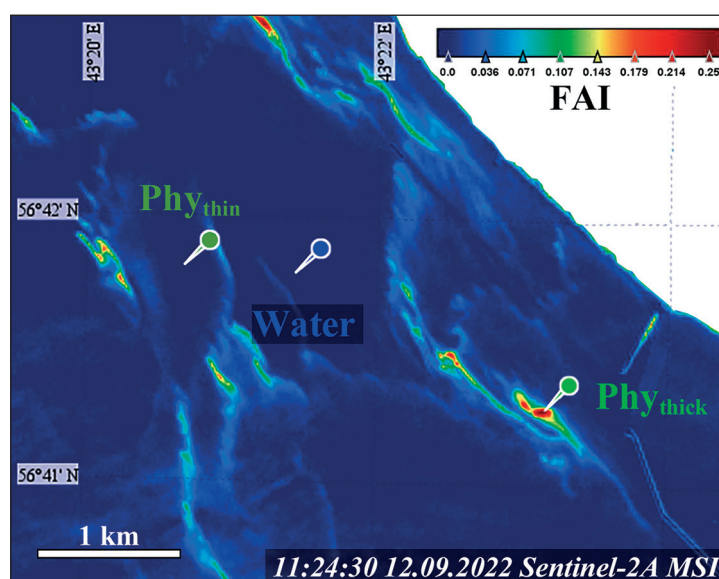


Рис. 3. Пространственное распределение плавающих водорослей (FAI), восстановленное по данным Sentinel-2 MSI за 12.09.2022

Из приведённых на *рис. 3* данных можно сделать вывод, что распределение плавающих на поверхности воды водорослей является сильно неоднородным. Наиболее высокие значения FAI соответствовали областям визуально наблюдавшимся с судна плёнок типа «корки». Сопоставляя распределение FAI с оптическим изображением, можно заключить, что наиболее яркие участки на последнем отвечают областям толстых биогенных плёнок. Можно полагать, что толщина этих плёнок не меньше характерных размеров частиц фитопланктона, в частности цианобактерий, размеры которых варьируются от 1 до 9 мкм.

Интересно сравнить особенности проявления на изображениях плёнок фитопланктона и плёнок ПАВ, которые часто используются при проведении экспериментов с искусственными плёнками ПАВ (см., например (Ермаков, 2010)). Как уже отмечалось выше, в случаях, когда средняя концентрация ПАВ на поверхности воды существенно превышает концентрацию мономолекулярной плёнки, образуется перенасыщенная плёнка, типичный вид которой приведён на *рис. 2б*. Перенасыщенные плёнки представляют собой двухфазную среду, состоящую из прозрачного, невидимого в оптике мономолекулярного слоя с плотной упаковкой молекул ПАВ (предельный монослой) и капель (линз), в которых сосредоточен избыток ПАВ. В натуральных условиях перенасыщенная плёнка олеиновой кислоты (OLE) имеет вид фрагментированной корки (и в этом отношении она имеет сходство с биогенной коркой), разделённой областями мономолекулярной плёнки (см. *рис. 2б*), фрагменты корки видны из-за

скопления капель ПАВ, мелких частиц, пылицы растений. Отметим, что радужные области в такой плёнке обычно не наблюдаются, а средняя толщина перенасыщенных плёнок ПАВ, определяемая по известному объёму вылитого ПАВ и площади пятен, для наших экспериментов можно оценить как имеющую порядок 0,1 мкм. Перенасыщенные плёнки могут формироваться в центральных областях разливов ПАВ и проявляться на спутниковых оптических изображениях в виде светлых областей, тогда как периферийная мономолекулярная плёнка видна как тёмная область, что связано с гашением гравитационно-капиллярных волн в плёнке. Пример спутникового MSI-изображения разлива искусственной плёнки OLE приведён на *рис. 4*.

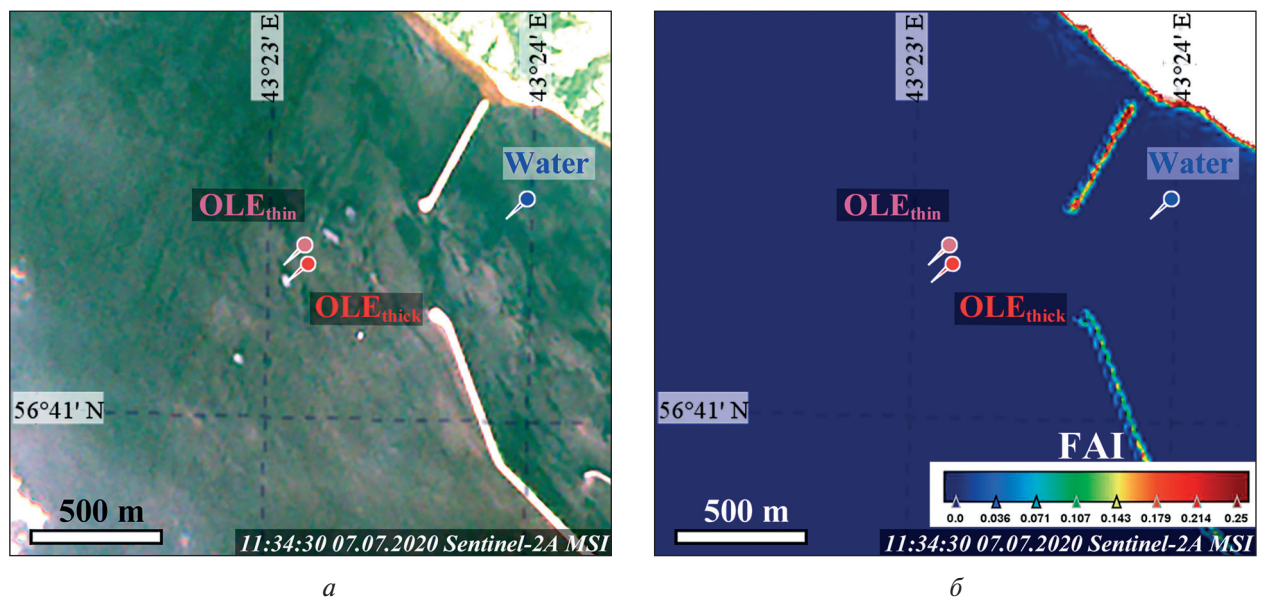


Рис. 4. Пример спутникового оптического изображения искусственных сликов — разливов ПАВ (OLE) — на Горьковском вдхр. 07.07.2020 (*а*) и индекс FAI (*б*)

Следует подчеркнуть, что расчёт FAI для такой плёнки ПАВ ожидаемо даёт очень малые значения этого индекса (см. *рис. 4б*).

Спектральные контрасты толстых плёнок

Спектральный контраст будем характеризовать отношением коэффициентов отражения для чистой воды и для плёнки в определённых спектральных диапазонах длин волн. Для анализа спектральных контрастов все каналы были приведены к одному пространственному разрешению в 10 м методом билинейной интерполяции с помощью платформы для обработки спутниковых данных SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform) (<https://step.esa.int/>). Примеры спутниковых изображений в естественных цветах, по которым оценивались контрасты, представлены на *рис. 1* и *4*. Спектральный контраст толстых биогенных плёнок определялся как отношение спектральной яркости из областей «чистой воды», т.е. с низкой концентрацией фитопланктона, к яркости областей с высоким содержанием фитопланктона (высоким значением FAI).

На *рис. 5* (см. с. 279) представлены зависимости спектральных контрастов для толстых биогенных плёнок, отвечающих областям с высоким индексом FAI (Phy_{thick} на *рис. 1* и *3*). Здесь же приведены контрасты для областей перенасыщенной плёнки OLE от длины волны излучения (OLE_{thick} на *рис. 4*).

Из анализа представленных спектральных контрастов видно, что толстые биогенные плёнки характеризуются минимумами в зелёном диапазоне (560 нм), красном и NIR (740–

865 нм), а также в SWIR (длина волны 1610 нм), при этом наиболее выраженный минимум находится в красном и NIR-диапазонах. Плёнки OLE характеризуются двумя близкими по значению контраста минимумами в красном диапазоне (665 нм) и в NIR (842–865 нм). Из сравнения спектральных контрастов этих плёнок видно, что они существенно отличаются друг от друга в красном и NIR-диапазонах как по абсолютным значениям, так и по перепадам контраста в зависимости от длины волны.

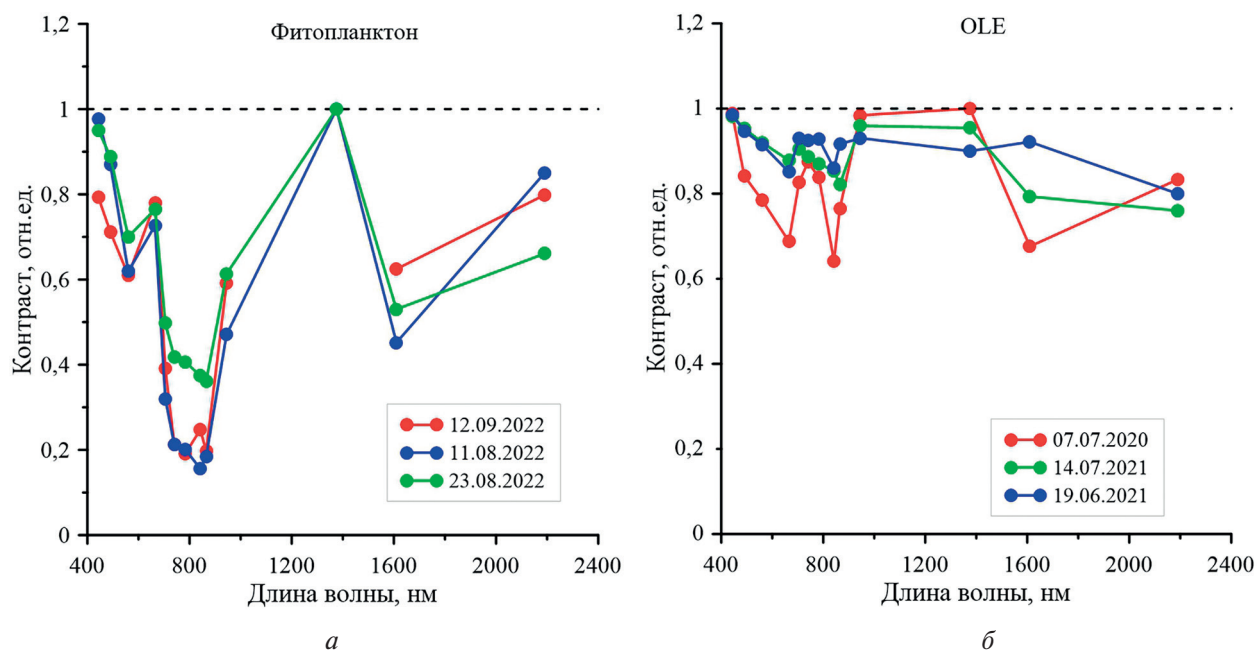


Рис. 5. Спектральные контрасты (чистая вода/плёнка) для толстых биогенных плёнок (а) и сверхнасыщенных плёнок OLE (б) в зависимости от длины волны излучения

Локальный максимум контрастов в случае OLE в красном диапазоне, предположительно, связан с поглощением водой излучения на длинах волн 740–760 нм из-за наличия участков мономолекулярной плёнки, обеспечивающей относительно свободное прохождение света в воду.

Обсуждение результатов

Сравним полученные выше спектральные контрасты для толстых и тонких биоплёнок фитопланктона и перенасыщенных и мономолекулярных плёнок ПАВ (OLE). Последние при расчёте контрастов выбирались на периферии разливов ПАВ, где отсутствуют острова плотной корки, сама плёнка не видна визуально и проявляется лишь благодаря эффекту подавления ветровой ряби (OLE_{thin} на рис. 4). Тонкие биогенные плёнки выбирались в областях, где видно присутствие фитопланктона, однако значения индекса FAI в них около или ниже нуля (Phy_{thin} на рис. 1 и 3). Характерные зависимости контрастов от длины волны излучения для ряда спутниковых изображений для указанных различных типов плёнок приведены на рис. 6 (см. с. 280).

Видно, что в ближнем ИК-диапазоне контрасты для тонких биогенных плёнок при небольшой концентрации фитопланктона близки по характеру и по величине к перенасыщенным плёнкам ПАВ. При этом в SWIR-диапазоне различие между этими типами плёнок существенно, контрасты тонких биогенных плёнок близки по значениям к контрастам мономолекулярных плёнок ПАВ. Отметим, что, согласно предварительному анализу, хорошо растёкшиеся, мономолекулярные плёнки других ПАВ (додецилового спирта и растительного

масла) имеют контрасты, схожие со случаем мономолекулярной плёнки OLE. Следует напомнить, что представленные данные были получены для штилевых условий (скорости ветра порядка и менее 2 м/с). В условиях более сильного ветра контрасты могут отличаться от приведённых выше и будут более подробно анализироваться позднее.

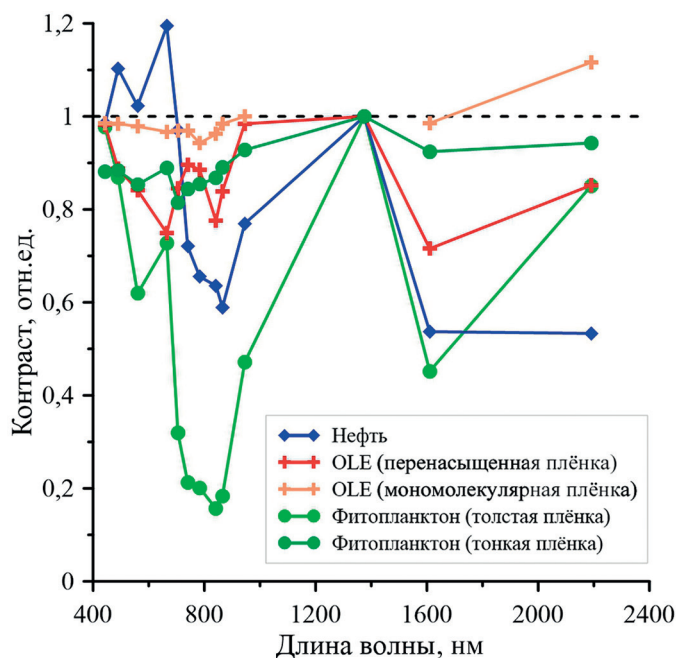


Рис. 6. Сравнение типичных спектральных контрастов толстых и тонких биоплёнок и ПАВ

Толстые биогенные плёнки характеризуются контрастами, значительно меньшими 1 как в NIR-, так и в SWIR-диапазоне. Интересно отметить, что схожий характер контраста, особенно в SWIR, наблюдается и для толстых нефтяных плёнок, в частности при анализе изображений нефтяного разлива (Rajendran et al., 2021); в видимом диапазоне толстая нефтяная плёнка может проявляться как более тёмная по сравнению с водой, что приводит к значениям контраста, большим 1. В дальнейшем планируется провести более детальный анализ контрастов для нефтяных плёнок в указанных диапазонах для различных метеоусловий и характеристик разливов.

Заключение

Кратко суммируем полученные результаты:

1. Биогенные плёнки в областях сильного цветения фитопланктона являются достаточно толстыми, могут иметь вид корки и проявляться на NIR- и SWIR-изображениях как яркие области.
2. Контрасты тонких биогенных плёнок в NIR-диапазоне близки к контрастам перенасыщенных (немономолекулярных) плёнок ПАВ.
3. В SWIR-диапазоне контрасты тонких биогенных плёнок, как и в случае мономолекулярных плёнок ПАВ, близки к 1 и сильно отличаются от контрастов перенасыщенных плёнок ПАВ.

Указанные особенности контрастов в мультиспектральных изображениях биогенных плёнок могут быть использованы в качестве дополнительной информации, например при решении задач дистанционной диагностики биогенных плёнок, в том числе с использованием микроволновых радиолокаторов.

Авторы благодарят А.А. Молькова, И.А. Капустина, Г.В. Лещева, Т.Н. Лазареву за помощь при проведении подспутниковых экспериментов, а также рецензента за конструктивные замечания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00167).

Литература

1. Даниличева О. А., Ермаков С. А., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Лазарева Т. Н., Лещев Г. В., Доброхотова Д. В., Сергиевская И. А. Проявление зон интенсивного цветения фитопланктона в радиолокационных сигналах при зондировании внутренних водоемов // Тр. 7-й Всерос. науч. конф. «Проблемы экологии Волжского бассейна». Нижний Новгород, 2022. Вып. 5. 4 с.
2. Ермаков С. А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
3. Калинина О. Ю., Сапожников Ф. В. Результаты исследования обрастания микроводорослями пластикового мусора // Окружающая среда и энергетика. 2019. № 4. С. 46–53. DOI: 10.5281/zenodo.3662774.
4. Мольков А. А., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Ермаков С. А. Дистанционные методы определения толщины плёнок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27.
5. Alpers W., Hühnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophysical Research: Oceans. 1989. V. 94. No. C5. P. 6251–6265. DOI: 10.1029/JC094iC05p06251.
6. Alpers W., Holt B., Zeng K. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 201. P. 133–147. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.002.
7. Ermakov S. A., Kijashko S. V. Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films // Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions and Remote Sensing. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. P. 113–128. DOI: 10.1007/3-540-33271-5_12.
8. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaya I. A., Andriyanova N. V. On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. P. 307–314. DOI: 10.1134/S0001433813030055.
9. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Da Silva J. C. et al. Remote sensing of organic films on the water surface using dual co-polarized ship-based X-/C-/S-band radar and TerraSAR-X // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 7. Article 1097. DOI: 10.3390/rs10071097.
10. Fingas M., Brown C. Review of oil spill remote sensing // Marine Pollution Bull. 2014. V. 83. No. 1. P. 9–23. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.059.
11. Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H., Masuko H., Kobayashi T. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // J. Geophysical Research: Oceans. 1998. V. 103. No. C9. P. 18851–18866. DOI: 10.1029/97JC01915.
12. Gade M., Hühnerfuss H., Korenowski G. Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 341 p. DOI: 10.1007/3-540-33271-5.
13. Gilerson A. A., Gitelson A. A., Zhou J. et al. Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands // Optics Express. 2010. V. 18. No. 23. P. 24109–24125. DOI: 10.1364/OE.18.024109.
14. Gitelson A. A. Nature of the peak near 700-nm on the radiance spectra and its application for remote estimation of phytoplankton pigments in inland waters // 8th Meeting on Optical Engineering in Israel: Optical Engineering and Remote Sensing. 1993. V. 1971. P. 170–179. DOI: 10.1117/12.150992.
15. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. No. 10. P. 2118–2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
16. Hu C. Hyperspectral reflectance spectra of floating matters derived from Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) observations // Earth System Science Data. 2022. V. 14. No. 3. P. 1183–1192. DOI: 10.5194/essd-14-1183-2022.
17. Hühnerfuss H., Lange P., Walter W. Wave damping by monomolecular surface films and their chemical structure. Part II: Variation of the hydrophilic part of the film molecules including natural substances // J. Marine Research. 1984. V. 42. No. 3. P. 737–759.
18. Kram M., Laverman L. System and method for optical detection of petroleum and other products in an environment. Patent US 7227139. Reg. 05.06.2007.

19. Lin I. I., Alpers W., Liu W. T. First evidence for the detection of natural surface films by the QuikSCAT scatterometer // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. No. 13. Article 1713. DOI: 10.1029/2003GL017415.
20. Molkov A. A., Fedorov S. V., Pelevin V. V., Korchemkina E. N. Regional models for high-resolution retrieval of chlorophyll a and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 imagery // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 10. Article 1215. DOI: 10.3390/rs11101215.
21. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C., Siegel D. A., Toole D., Menzies D., Smith R. C., Mueller J. L., Mitchell B. G., Kahru M. et al. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses // NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center. 2000. V. 11. Pt. 3. Ch. 2. P. 9–23.
22. Qi L., Wang M., Hu C., Holt B. On the capacity of Sentinel-1 synthetic aperture radar in detecting floating macroalgae and other floating matters // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 280. Article 113188. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113188.
23. Rajendran S., Sadooni F. N., Al-Kuwari H. A. S. et al. Monitoring oil spill in Norilsk, Russia using satellite data // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. No. 1. Article 3817. DOI: 10.1038/s41598-021-83260-7.
24. Scott J. C., Thomas N. H. Sea surface slicks-surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing / *Inst. Mathematics and its Applications Conf. Sers. Oxford; Clarendon*, 1999. V. 69. P. 221–230.
25. Smith I., Stanton T., Law A. Plastic habitats: Algal biofilms on photic and aphotic plastics // *J. Hazardous Materials Letters*. 2021. V. 2. Article 100038. DOI: 10.1016/j.hazl.2021.100038.
26. Zettler E. R., Mincer T. J., Amaral-Zettler L. A. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris // *Environmental Science and Technology*. 2013. V. 47. No. 13. P. 7137–7146. DOI: 10.1021/es401288x.
27. Zhao J., Temimi M., Ghedira H., Hu C. Exploring the potential of optical remote sensing for oil spill detection in shallow coastal waters—a case study in the Arabian Gulf // *Optics Express*. 2014. V. 22. No. 11. P. 13755–13772. DOI: 10.1364/OE.22.013755.

On biogenic film manifestations in satellite multispectral images of eutrophic water bodies

O. A. Danilicheva¹, S. A. Ermakov^{1,2}

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: olgadan@ipfran.ru

² *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: stas.ermakov@ipfran.ru

The available data of satellite multispectral observations of a eutrophicated reservoir using the example of the Gorky Reservoir, in particular in the near-infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR) bands, in areas of intense phytoplankton blooming, as well as in spills of surfactant on the water surface, were analyzed. Satellite data from Sentinel-2 MSI and associated sub-satellite observations were used for analysis. Spectral contrasts for films of different nature and thickness in the visible and NIR/SWIR bands were analyzed. It is shown that biogenic films on the water surface in areas of intense phytoplankton blooming can be thick and appear as areas of dense “crust”, which are characterized by significant contrasts in images of NIR and SWIR bands. Thin biogenic films, which are considered to be quasi-monomolecular, are weakly visible in SWIR images and are comparable in contrast values to monomolecular surfactant films, whose contrasts in both bands are close to 1. However, in the NIR band, the contrast values of thin biogenic films are more significant and close to non-monomolecular surfactant films whose average concentration exceeds the limiting thickness of surfactant monolayers (supersaturated films). Nevertheless, in the SWIR range, the difference between thin biogenic films and supersaturated surfactant films is significant. The specified features of contrasts in multispectral images of biogenic films can be used as additional information, for example, when solving problems of remote diagnostics of films, including microwave radars.

Keywords: biogenic films, surfactant films, satellite images, multispectral data, Sentinel-2

Accepted: 14.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284

References

1. Danilicheva O. A., Ermakov S. A., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Lazareva T. N., Leshchov G. V., Dobrokhotova D. V., Sergiyevskaya I. A., Manifestation of intensive phytoplankton flowering zones in radar signals during internal water bodies sounding, *Trudy 7-i vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Problemy ekologii Volzhskogo basseina"* (Proc. All-Russia Scientific Conf. "Ecology problems of the Volga basin"), Nizhny Novgorod, 2022, Issue 5, 4 p. (in Russian).
2. Ermakov S. A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Impact of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p. (in Russian).
3. Kalinina O. Yu., Sapozhnikov F. V., The study results of plastic waste overgrowth with micro-algae, *J. Environmental Earth and Energy Study*, 2019, No. 4, pp. 46–53 (in Russian), DOI: 10.5281/zenodo.3662774.
4. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Ermakov S. A., Remote sensing methods for measuring the thickness of oil/oil product films on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27.
5. Alpers W., Hühnerfuss H., The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1989, Vol. 94, No. C5, pp. 6251–6265, DOI: 10.1029/JC094iC05p06251.
6. Alpers W., Holt B., Zeng K., Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 201, pp. 133–147, DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.002.
7. Ermakov S. A., Kijashko S. V., Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films, *Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions and Remote Sensing*, Berlin; Heidelberg: Springer, 2006, pp. 113–128, DOI: 10.1007/3-540-33271-5_12.
8. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergiyevskaya I. A., Andriyanova N. V., On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, pp. 307–314, DOI: 10.1134/S0001433813030055.
9. Ermakov S. A., Sergiyevskaya I. A., Da Silva J. C. et al., Remote sensing of organic films on the water surface using dual co-polarized ship-based X-/C-/S-band radar and TerraSAR-X, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 7, Article 1097, DOI: 10.3390/rs10071097.
10. Fingas M., Brown C., Review of oil spill remote sensing, *Marine Pollution Bull.*, 2014, Vol. 83, No. 1, pp. 9–23, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.059.
11. Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H., Masuko H., Kobayashi T., Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1998, Vol. 103, No. C9, pp. 18851–18866, DOI: 10.1029/97JC01915.
12. Gade M., Hühnerfuss H., Korenowski G., *Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, 341 p., DOI: 10.1007/3-540-33271-5.
13. Gilerson A. A., Gitelson A. A., Zhou J. et al., Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands, *Optics Express*, 2010, Vol. 18, No. 23, pp. 24109–24125, DOI: 10.1364/OE.18.024109.
14. Gitelson A. A., Nature of the peak near 700-nm on the radiance spectra and its application for remote estimation of phytoplankton pigments in inland waters, *8th Meeting on Optical Engineering in Israel: Optical Engineering and Remote Sensing*, 1993, Vol. 1971, pp. 170–179, DOI: 10.1117/12.150992.
15. Hu C., A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 10, pp. 2118–2129, DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
16. Hu C., Hyperspectral reflectance spectra of floating matters derived from Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) observations, *Earth System Science Data*, 2022, Vol. 14, No. 3, pp. 1183–1192, DOI: 10.5194/essd-14-1183-2022.
17. Hühnerfuss H., Lange P., Walter W., Wave damping by monomolecular surface films and their chemical structure, Part II: Variation of the hydrophilic part of the film molecules including natural substances, *J. Marine Research*, 1984, Vol. 42, No. 3, pp. 737–759.
18. Kram M., Laverman L., *System and method for optical detection of petroleum and other products in an environment*, Patent US 7227139, Reg. 05.06.2007.
19. Lin I. I., Alpers W., Liu W. T., First evidence for the detection of natural surface films by the QuikSCAT scatterometer, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 13, Article 1713, DOI: 10.1029/2003GL017415.
20. Molkov A. A., Fedorov S. V., Pelevin V. V., Korchemkina E. N., Regional models for high-resolution retrieval of chlorophyll a and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 imagery, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 10, Article 1215, DOI: 10.3390/rs11101215.
21. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C., Siegel D. A., Toole D., Menzies D., Smith R. C., Mueller J. L., Mitchell B. G., Kahru M. et al., SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses,

- NASA Technical Memorandum*, Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000, Vol. 11, Part 3, Ch. 2, pp. 9–23.
22. Qi L., Wang M., Hu C., Holt B., On the capacity of Sentinel-1 synthetic aperture radar in detecting floating macroalgae and other floating matters, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 280, Article 113188, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113188.
 23. Rajendran S., Sadooni F. N., Al-Kuwari H. A. S. et al., Monitoring oil spill in Norilsk, Russia using satellite data, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, No. 1, Article 3817, DOI: 10.1038/s41598-021-83260-7.
 24. Scott J. C., Thomas N. H., *Sea surface slicks-surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing*, Inst. Mathematics and its Applications Conf. Ser., Oxford; Clarendon, 1999, Vol. 69, pp. 221–230.
 25. Smith I. L., Stanton T., Law A., Plastic habitats: Algal biofilms on photic and aphotic plastics, *J. Hazardous Materials Letters*, 2021, Vol. 2, Article 100038, DOI: 10.1016/j.hazl.2021.100038.
 26. Zettler E. R., Mincer T. J., Amaral-Zettler L. A., Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris, *Environmental science and technology*, 2013, Vol. 47, No. 13, pp. 7137–7146, DOI: 10.1021/es401288x.
 27. Zhao J., Temimi M., Ghedira H., Hu C., Exploring the potential of optical remote sensing for oil spill detection in shallow coastal waters-a case study in the Arabian Gulf, *Optics Express*, 2014, Vol. 22, No. 11, pp. 13755–13772, DOI: 10.1364/OE.22.013755.