

О возможностях использования спектральных индексов для идентификации пластикового мусора на спутниковых мультиспектральных изображениях океана

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*

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу существующих спектральных индексов, полученных из спутниковых мультиспектральных изображений поверхности океана и внутренних водоёмов, с целью выявления наиболее эффективного для обнаружения плавающего в океане пластикового мусора. Анализ выполнен на основе представленных в литературе спутниковых мультиспектральных наблюдений пластикового мусора со спутника Sentinel-2 в ходе контролируемых натурных экспериментов. Помимо сравнения индексов между собой в задаче обнаружения пластикового мусора, рассматривается также возможность отличать пластиковый мусор от других поверхностных загрязнений, например деревянных фрагментов, толстых биогенных плёнок (водоросли саргассума, фитопланктон), морской слизи, нефти и пр. Для мультиспектральных изображений Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument) выполнены расчёты широко используемых спектральных индексов, а именно: FDI (*англ.* Floating Debris Index), FAI (*англ.* Floating Algae Index), NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и PI (*англ.* Plastic Index). Показано, что для диагностики зон пластикового мусора на поверхности воды наиболее эффективным, по сравнению с другими, представляется индекс FAI, а не PI. Отмечено, что индекс FAI, однако, не позволяет однозначно идентифицировать пластиковый мусор на фоне некоторых загрязнений, например нефти, что требует дальнейшего развития принципов диагностики пластикового мусора в океане.

Ключевые слова: пластиковый мусор, водная поверхность, спутниковые изображения, мультиспектральные данные, Sentinel-2, спектральные индексы

Одобрена к печати: 29.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-274-284

Введение

Морской мусор, в том числе пластиковый, — это отходы антропогенной природы, которые попадают в морские и пресноводные экосистемы (Shevealy et al., 2012). Пластиковые отходы, обладая меньшей, чем у воды, плотностью, плавают на поверхности водоёмов и могут образовывать скопления, которые переносятся ветром и океаническими течениями на большие расстояния, при этом часть пластиковых предметов со временем погружается вглубь воды (Biermann et al., 2020; Carlson et al., 2017; Möhlenkamp et al., 2018). Значительная часть пластикового мусора (ПМ) скапливается в океанических вихрях, образуя большие по площади зоны загрязнений, такие как Большое Тихоокеанское мусорное пятно (*англ.* Great Pacific Garbage Patch — GPGP) (Chu et al., 2015; Lebreton et al., 2018).

Пластиковый мусор негативно влияет на морскую фауну, вызывая интоксикацию, удушье и гибель животных (Derraik, 2002; Rochman et al., 2016). Он также способствует распространению инвазивных видов, в частности микроводорослей-обрастателей (Vodeneeva et al., 2024), и выбросу токсичных химических веществ в окружающую среду (Kwon et al., 2015; Wilcox et al., 2015). Таким образом, пластиковый мусор, поступающий из различных источников, в том числе с речным стоком в океан, оказывает весьма значительное негативное воздействие на морскую экосистему, поэтому мониторинг ПМ является важной экологической задачей.

Контактные исследования распределения ПМ в различных водоёмах, проводимые на открытой воде и прибрежных областях, требуют значительных временных и финансовых затрат, обеспечивая, однако, ограниченное покрытие и временное разрешение, поэтому особая роль в решении проблемы диагностики ПМ связана с использованием методов дистанционного зондирования (Garaba et al., 2018). Хотя использование методов дистанционного мониторинга ПМ находится пока на начальной стадии, в литературе описаны попытки применения этих методов (Biermann et al., 2020; Goddijn-Murphy et al., 2018). Следует отметить, что значительное внимание уделяется развитию спутниковых мультиспектральных методов зондирования плавающего ПМ, которые включают проведение контролируемых лабораторных экспериментов (Garaba, Harmel, 2022; Knaeps et al., 2021; Moshtaghi et al., 2021) и натурные наблюдения (Kremezi et al., 2021; Themistocleous et al., 2020; Topouzelis et al., 2019) по изучению спектральных характеристик как ПМ, так и других биогенных и антропогенных загрязнений водной среды (Hu, 2009; Kikaki et al., 2022; Mikeli et al., 2022). В ряде работ были предложены спектральные подходы и решения на основе искусственного интеллекта для обнаружения плавающего мусора, а также разработаны новые методологии такого обнаружения (Basu et al., 2021; Kremezi et al., 2022; Sannigrahi et al., 2022).

Одним из наиболее активно используемых подходов к решению проблемы обнаружения ПМ на поверхности водоёмов с помощью данных дистанционного зондирования стало применение различных спектральных индексов (Waqas et al., 2023). Спектральные индексы позволяют идентифицировать и разделять плавающие агрегированные материалы и воду. Эти индексы используют спектральные значения пластиковых материалов в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра для определения формы и размера крупномасштабного плавающего мусора. При наличии целого ряда спектральных индексов возникает, однако, вопрос о выборе среди них наиболее информативного для задач диагностики ПМ.

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу существующих спектральных индексов с целью выявления наиболее эффективного для обнаружения плавающего в океане ПМ. Анализ выполнен на основе представленных в литературе спутниковых мультиспектральных наблюдений ПМ со спутника Sentinel-2 в ходе контролируемых натурных экспериментов. Помимо сравнения индексов между собой в задаче обнаружения пластикового мусора, рассматривается также возможность отличать ПМ от других поверхностных загрязнений, например деревянных фрагментов, толстых биогенных плёнок, морской слизи, нефти и пр. Статья организована следующим образом. Вначале приводится описание спутниковых экспериментов с имитаторами ПМ, далее представляются изображения поверхностных загрязнений с использованием прибора MSI (*англ.* Multispectral Instrument), затем рассчитываются спектральные индексы для разных типов мусора и проводится их сравнение.

Данные наблюдений

В ходе исследования, направленного на определение наиболее эффективного индекса для выявления пластикового мусора на поверхности водоёмов, были проанализированы мультиспектральные спутниковые данные Sentinel-2 MSI. В рамках этого анализа рассматривался не только ПМ, находящийся на поверхности океана, но и другие виды загрязнений, включая деревянные обломки, толстые биогенные плёнки (скопления саргассума/фитопланктон), морскую слизь, нефтяные плёнки, а также плёнки поверхностно-активного вещества — олеиновой кислоты (OLE), последние активно применяются для моделирования плёночных slicks в океане и внутренних водоёмах (Ермаков, 2010).

Спектральные индексы для ПМ рассматривались на основе известных из литературы контролируемых подспутниковых экспериментов, в частности на основе натурных экспериментов Plastic Litter Projects (<https://plp.aegean.gr/>). Контролируемые натурные эксперименты по данному проекту проводятся ежегодно, начиная с 2018 г., в прибрежной области острова Лесбос, Греция. Анализировались эксперименты 2018 и 2021 гг., когда использовались срав-

нительно большого размера имитаторы ПМ из полиэтилена высокой плотности HDPE (*англ.* high-density polyethylene), покрывавшие площадь, превышающую пространственное разрешение открытых спутниковых мультиспектральных данных Sentinel-2 (10×10 м) (Palacios, 2024; Papageorgiou et al., 2022; Topouzelis et al., 2019).

Также анализировались данные контролируемого подспутникового эксперимента, описанного в работе (Themistocleous et al., 2020). Эксперимент проводился в прибрежной области г. Лимасол, Кипр, в декабре 2018 г., где в качестве имитаторов ПМ использовалось полотно из скреплённых пластиковых бутылок с размерами 3×10 м.

В качестве других видов загрязнений рассматривались плавающие на поверхности воды плёнки/маты/корки саргассума, толстые биогенные плёнки (скопление фитопланктона), морская слизь, деревянные обломки, плёнки OLE и нефтяные плёнки. Маты саргассума регулярно наблюдаются в Карибском море (Hernández-Núñez, Euán-Avila, 2025; Ody et al., 2019). Толстые биогенные плёнки образуются в период активного цветения фитопланктона (июль – сентябрь), в частности, на поверхности Балтийского моря (Лаврова и др., 2016; Konik et al., 2023), а также во внутренних водоёмах (Даниличева, Ермаков, 2023). Морская слизь активно распространялась в Мраморном море в мае – июне 2021 г. (Colkesen et al., 2023; Tuzcu Kokal et al., 2022). Деревянные обломки анализировались на основе данных экспериментов Plastic Litter Projects 2021, где помимо имитаторов ПМ использовались имитаторы деревянных обломков. Данные наблюдений плёнок OLE в ходе контролируемых подспутниковых экспериментов на Горьковском вдхр. с такими плёнками, проводившихся летом 2020–2021 гг., приведены в публикации (Даниличева, Ермаков, 2023). Нефтяные загрязнения анализировались на основе наблюдений, описанных в работах (D’Ugo et al., 2025; Majidi Nezhad et al., 2018; Setiani, Ramdani, 2018; Vankayalapati et al., 2023).

В табл. 1 представлен список анализируемых загрязнений, период и регион наблюдений.

Таблица 1. Список анализируемых данных по наблюдению загрязнений на поверхности воды

Тип загрязнения	Регион	Дата	Ссылки на литературу
Пластик и дерево	Зал. Гера, о. Лесбос, Греция	Июнь – сентябрь 2021 г.	(Palacios, 2024; Papageorgiou et al., 2022)
Пластик	Эгейское море, о. Лесбос, Греция	Июнь 2018 г.	(Topouzelis et al., 2019)
Пластик	Старый порт Лимасола, Кипр	Декабрь 2018 г.	(Themistocleous et al., 2020)
Саргассум	Карибское море, Гваделупа	Май – июль 2017–2023 гг.	(Ody et al., 2019)
Саргассум	Карибское море, Белиз	Июнь – июль 2018–2023 гг.	(Hernández-Núñez, Euán-Avila, 2025)
Скопления фитопланктона	Балтийское море, о. Готланд, Швеция	Июль 2018–2022 гг.	
Скопления фитопланктона	Горьковское вдхр., Россия	Август – сентябрь 2017–2020 гг.	
Морская слизь	Мраморное море, Турция	Май – июнь 2021 г.	(Colkesen et al., 2023; Tuzcu Kokal et al., 2022)
Плёнки OLE	Горьковское вдхр., Россия	Июнь – июль 2020–2021 гг.	(Даниличева, Ермаков, 2023)
Нефть	Персидский зал., Кувейт	Июль 2017 г.	(Majidi Nezhad et al., 2018)
Нефть	Макасарский пролив, Индонезия	Апрель 2018 г.	(Setiani, Ramdani, 2018)
Нефть	Красное море, Саудовская Аравия	Октябрь 2019 г.	(Vankayalapati et al., 2023)
Нефть	Атлантический океан, о. Тобаго	Февраль 2024 г.	(D’Ugo et al., 2025)

Спектральные индексы

В обзоре (Waqas et al., 2023) представлен ряд спектральных индексов, которые в настоящее время могут быть использованы для обнаружения пластикового мусора. Нами были проанализированы все приведённые индексы, но наиболее информативными оказались индексы FDI (*англ.* Floating Debris Index), FAI (*англ.* Floating Algae Index), NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и PI (*англ.* Plastic Index).

Индекс плавающего мусора FDI был предложен в работе (Biermann et al., 2020) для идентификации различного мусора, в том числе микропластика. Индекс плавающих на поверхности воды водорослей FAI разработан в исследовании (Hu, 2009) и нацелен на детектирование плотных скоплений фитопланктона на поверхности воды. Нормализованный вегетационный индекс NDVI, описанный в работе (Tucker, 1979), наиболее часто используется в сельском хозяйстве для оценки характеристик (плотности и «здоровья») земного растительного покрова, но также может применяться и для идентификации различных типов мусора на поверхности воды. Зачастую индекс NDVI используется совместно с индексом FDI, где последний отвечает за детектирование плавающего мусора, а первый позволяет отличать растительные загрязнения от пластика, деревянных обломков, морской пены и пр. Индекс пластика PI специально разработан для обнаружения всех видов макропластика (Themistocleous et al., 2020).

Представленные выше индексы рассчитываются следующим образом:

$$FDI = R_{NIR} - R_{RE} + (R_{SWIR} - R_{RE}) \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{RE}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{RE}} \times 10,$$

$$FAI = R_{NIR} - R_{Red} - (R_{SWIR} - R_{Red}) \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{Red}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{Red}},$$

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}, \quad PI = \frac{R_{NIR}}{R_{NIR} + R_{Red}},$$

где R_i — коэффициент отражения на длине волны λ_i . Для расчётов индексов используются следующие значения длин волн: красный диапазон Red — 665 нм, красная граница RE (*англ.* Red Edge) — 740 нм, ближний инфракрасный диапазон NIR (*англ.* Near-Infrared) — 865 нм, коротковолновый инфракрасный диапазон SWIR (*англ.* Short Wave Infrared) — 1610 нм.

Сравнительный анализ индексов и их обсуждение

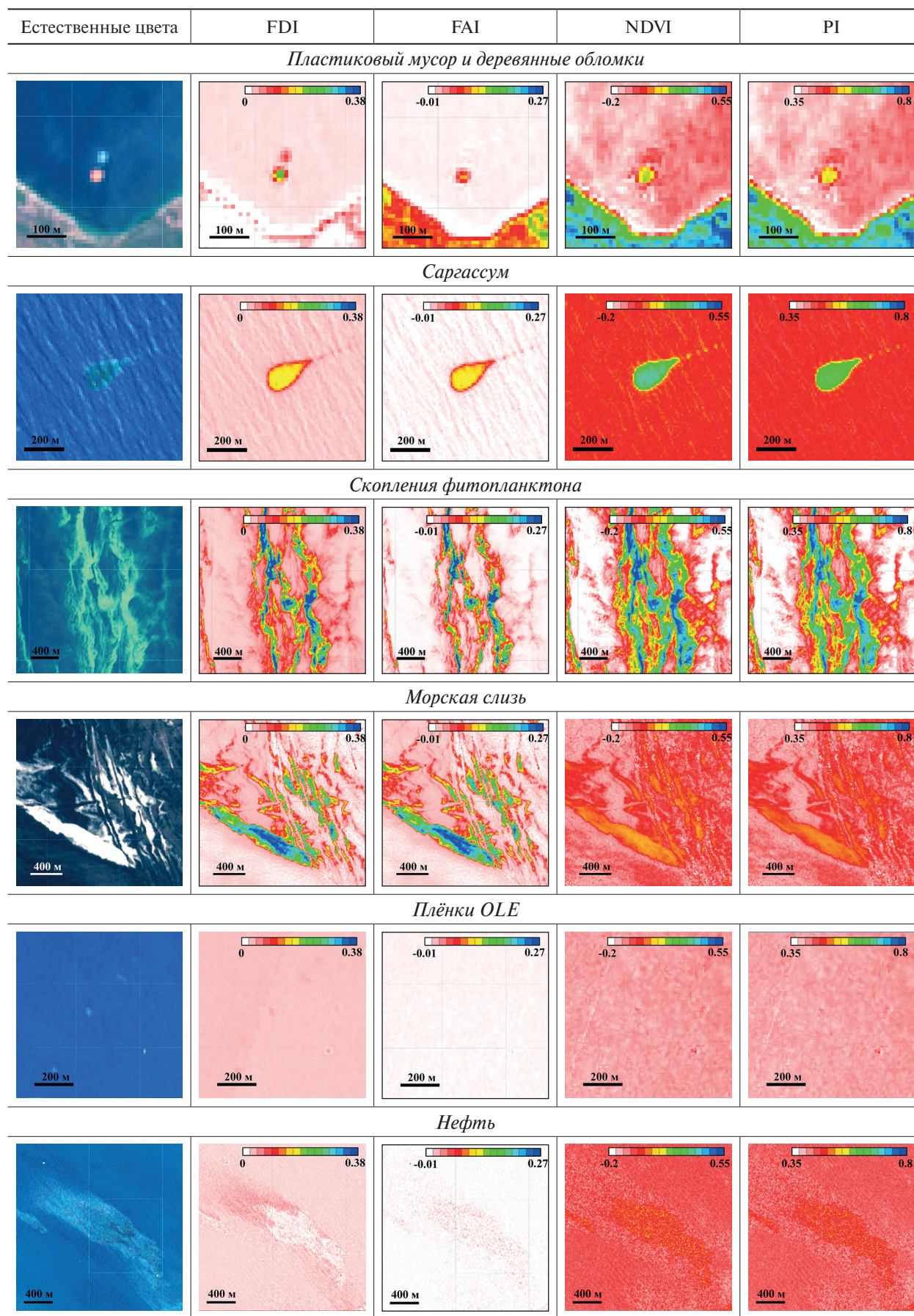
Рассматриваемые индексы сравнивались для разных типов загрязнений. В *табл. 2* представлены примеры анализируемых изображений в естественных цветах для различных типов загрязнений на поверхности воды и рассчитанные пространственные распределения индексов FDI, FAI, NDVI и PI.

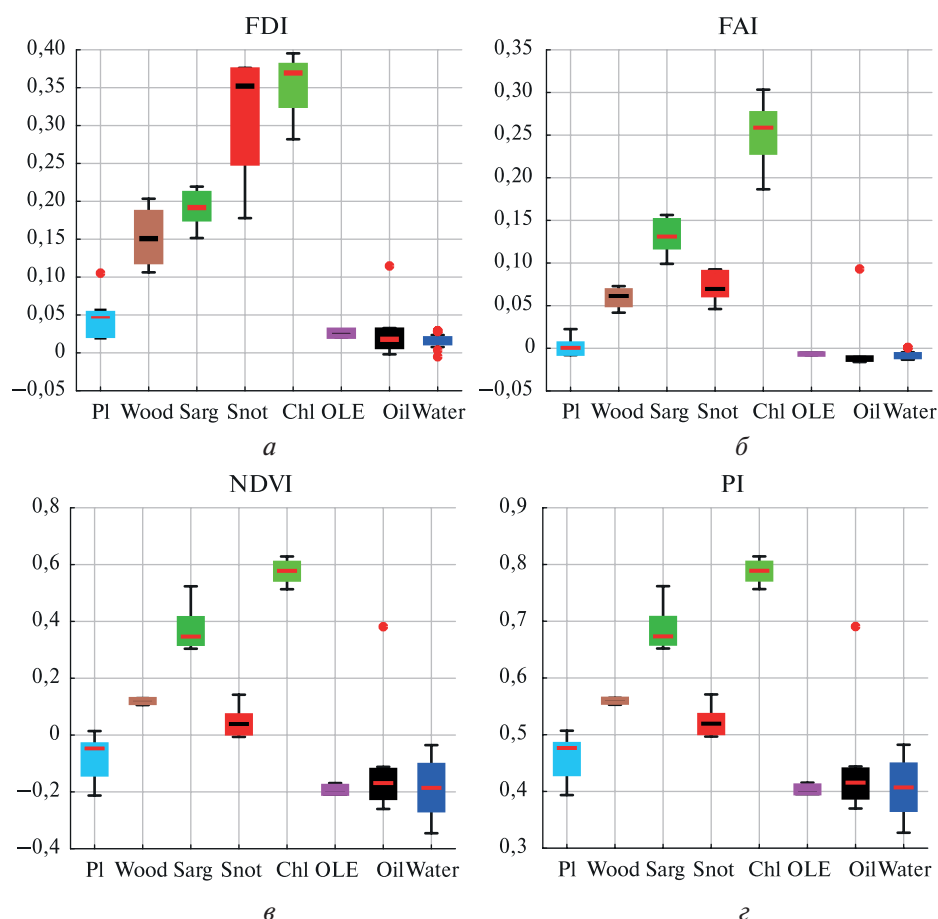
Из приведённых в таблице рисунков следует, что рассматриваемые индексы дают достаточно контрастные карты распределения загрязнений, однако для количественных выводов относительно эффективности того или иного индекса следует рассмотреть статистические оценки последних.

Эффективность индексов определяется как дисперсией значений индекса для каждого типа загрязнения — чем меньше дисперсия, тем надёжнее определяется тип загрязнения, так и разницей между их медианными значениями, что позволяет облегчить процесс распознавания различных типов загрязнений между собой. Помимо этого, поскольку представленные индексы используются для обнаружения загрязнений на поверхности воды, индекс загрязнения должен существенно отличаться от индекса чистой воды.

На *рисунке* (см. с. 279) приведены величины рассматриваемых индексов для разных типов загрязнений в виде блочных диаграмм. Высота блока фактически характеризует дисперсию значений индекса, полученных в рассматриваемых экспериментах и наблюдениях, и здесь же в блоках показаны медианные значения индексов.

Таблица 2. Примеры изображений анализируемых загрязнений, полученных с помощью Sentinel-2 MSI





Блочная диаграмма индексов FDI (а), FAI (б), NDVI (в) и PI (г) для различных типов загрязнений на поверхности воды (слева направо: пластик (PI), дерево (Wood), маты саргассума (Sarg), морская слизь (Snot), скопления фитопланктона (Chl), плёнки олеиновой кислоты (OLE), нефть (Oil), вода (Water)), полученных по спутниковым мультиспектральным данным Sentinel-2 MSI. Медианные значения показаны полосой внутри блока. Красные точки — неучтённые данные

Исходя из сформулированного критерия, можно заключить, что среди рассмотренных наиболее часто используемых индексов более эффективным для идентификации загрязнений на поверхности воды, в том числе пластиковых, является индекс FAI (см. рисунок), хотя он изначально ориентирован на обнаружение плотных скоплений растительности на поверхности воды. Несмотря на то, что индекс FAI оказался лучше других для идентификации ПМ, его значения для пластика перекрываются со значениями для нефти и плёнок OLE для всех индексов, что может приводить к ошибкам при диагностике ПМ. Следует также отметить, что индексы NDVI и PI отличаются лишь по абсолютным значениям и при нормировке на максимальное значение индексов для скоплений фитопланктона являются абсолютно идентичными.

Заключение

Кратко суммируем полученные результаты:

1. Выполнен сравнительный анализ имеющихся в литературе мультиспектральных спутниковых изображений загрязнений разного типа на поверхности воды, включая пластиковый мусор, деревянные фрагменты, толстые биогенные плёнки саргассума и фитопланктона, морскую слизь, нефтяные плёнки, плёнки поверхностно-активного вещества.

2. Рассчитаны наиболее широко используемые при анализе мультиспектральных данных спектральные индексы: FDI, FAI, NDVI и PI. Показано, что в задачах обнаружения и иденти-

фикации загрязнений пластиком на поверхности воды большей эффективностью из перечисленных индексов характеризуется индекс FAI, а не PI, как можно было бы ожидать.

3. В то же время использование индекса FAI не позволяет однозначно идентифицировать пластиковый мусор, например, в присутствии нефтяных плёнок. Таким образом, задача диагностики пластикового мусора с использованием существующих спектральных индексов пока не может считаться полностью решённой и требует дальнейшего развития принципов такой диагностики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00167, <https://rscf.ru/project/23-17-00167/>).

Литература

1. Даниличева О. А., Ермаков С. А. О проявлениях биогенных плёнок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водоёма // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 273–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284.
2. Ермаков С. А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
3. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 336 с.
4. Basu B., Sannigrahi S., Sarkar Basu A., Pilla F. Development of novel classification algorithms for detection of floating plastic debris in coastal waterbodies using multispectral Sentinel-2 remote sensing imagery // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 8. Article 1598. DOI: 10.3390/rs13081598.
5. Biermann L., Clewley D., Martinez-Vicente V., Topouzelis K. Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data // Scientific Reports. 2020. V. 10. Article 5364. DOI: 10.1038/s41598-020-62298-z.
6. Carlson D. F., Suaria G., Aliani S. et al. Combining litter observations with a regional ocean model to identify sources and sinks of floating debris in a semi-enclosed basin: The Adriatic Sea // Frontiers in Marine Science. 2017. V. 4. Article 78. DOI: 10.3389/fmars.2017.00078.
7. Chu S., Wang J., Leong G. et al. Perfluoroalkyl sulfonates and carboxylic acids in liver, muscle and adipose tissues of black-footed albatross (*Phoebastria nigripes*) from Midway Island, North Pacific Ocean // Chemosphere. 2015. V. 138. P. 60–66. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.043.
8. Colkesen I., Kavzoglu T., Sefercik U. G., Ozturk M. Y. Automated mucilage extraction index (AMEI): a novel spectral water index for identifying marine mucilage formations from Sentinel-2 imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2023. V. 44. No. 1. P. 105–141. DOI: 10.1080/01431161.2022.2158049.
9. D'Ugo E., Kallikkattilkuruvila A., Giuseppetti R. et al. A Sentinel-2-based system to detect and monitor oil spills: Demonstration on 2024 Tobago accident // Remote Sensing. 2025. V. 17. No. 2. Article 230. DOI: 10.3390/rs17020230.
10. Derraik J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // Marine Pollution Bull. 2002. V. 44. No. 9. P. 842–852. DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
11. Garaba S. P., Harmel T. Top-of-atmosphere hyper and multispectral signatures of submerged plastic litter with changing water clarity and depth // Optics Express. 2022. V. 30. No. 10. P. 16553–16571. DOI: 10.1364/OE.451415.
12. Garaba S. P., Aitken J., Slat B. et al. Sensing ocean plastics with an airborne hyperspectral shortwave infrared imager // Environmental Science and Technology. 2018. V. 52. No. 20. P. 11699–11707. DOI: 10.1021/acs.est.8b02855.
13. Goddijn-Murphy L., Peters S., van Seville E. et al. Concept for a hyperspectral remote sensing algorithm for floating marine macro plastics // Marine Pollution Bull. 2018. V. 126. P. 255–262. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.011.
14. Hernández-Núñez H., Euán-Avila J. I. Velocity of *Sargassum* migration in the Caribbean observed with Landsat 8/9 and Sentinel 2 A/B imagery // PLoS ONE. 2025. V. 20. No. 3. Article e0319391. DOI: 10.1371/journal.pone.0319391.
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. Kikaki K., Kakogeorgiou I., Mikeli P. et al. MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data // PLoS ONE. 2022. V. 17. No. 1. Article e0262247. DOI: 10.1371/journal.pone.0262247.

17. *Knaeps E., Sterckx S., Strackx G. et al.* Hyperspectral-reflectance dataset of dry, wet and submerged marine litter // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. No. 2. P. 713–730. DOI: 10.5194/essd-13-713-2021.
18. *Konik M., Bradtke K., Stoń-Egiert J. et al.* Cyanobacteria index as a tool for the satellite detection of cyanobacteria blooms in the Baltic Sea // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 6. Article 1601. DOI: 10.3390/rs15061601.
19. *Kremezi M., Kristollari V., Karathanassi V. et al.* Pansharpening PRISMA data for marine plastic litter detection using plastic indexes // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 61955–61971. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073903.
20. *Kremezi M., Kristollari V., Karathanassi V. et al.* Increasing the Sentinel-2 potential for marine plastic litter monitoring through image fusion techniques // *Marine Pollution Bull.* 2022. V. 182. Article 113974. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113974.
21. *Kwon B. G., Koizumi K., Chung S.-Y. et al.* Global styrene oligomers monitoring as new chemical contamination from polystyrene plastic marine pollution // *J. Hazardous Materials*. 2015. V. 300. P. 359–367. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.039.
22. *Lebreton L., Slat B., Ferrari F. et al.* Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. Article 4666. DOI: 10.1038/s41598-018-22939-w.
23. *Majidi Nezhad M., Groppi D., Laneve G. et al.* Oil spill detection analyzing “Sentinel 2” satellite images: A Persian Gulf case study // *Proc. 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18)*. 2018. Article AWSPT 134. 8 p. DOI: 10.11159/awspt18.134.
24. *Mikeli P., Kikaki K., Kakogeorgiou I., Karantzalos K.* How challenging is the discrimination of floating materials on the sea surface using high resolution multispectral satellite data? // *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. V. XLIII-B3-2022. P. 151–157. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-151-2022.
25. *Möhlenkamp P., Purser A., Thomsen L.* Plastic microbeads from cosmetic products: an experimental study of their hydrodynamic behaviour, vertical transport and resuspension in phytoplankton and sediment aggregates // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2018. V. 6. Article 61. DOI: 10.1525/elementa.317.
26. *Moshtaghi M., Knaeps E., Sterckx S. et al.* Spectral reflectance of marine macroplastics in the VNIR and SWIR measured in a controlled environment // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article 5436. DOI: 10.1038/s41598-021-84867-6.
27. *Ody A., Thibaut T., Berline L. et al.* From In Situ to satellite observations of pelagic *Sargassum* distribution and aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean // *PLoS ONE*. 2019. V. 14. No. 9. Article e0222584. DOI: 10.1371/journal.pone.0222584.
28. *Palacios J. S.* Remote sensing of marine plastic debris using satellite images off the coast of the Basque Country // <https://www.researchgate.net>. 2024. 29 p.
29. *Papageorgiou D., Topouzelis K., Suaria G. et al.* Sentinel-2 detection of floating marine litter targets with partial spectral unmixing and spectral comparison with other floating materials (Plastic Litter Project 2021) // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 23. Article 5997. DOI: 10.3390/rs14235997.
30. *Rochman C. M., Browne M. A., Underwood A. J. et al.* The ecological impacts of marine debris: unravelling the demonstrated evidence from what is perceived // *Ecology*. 2016. V. 97. No. 2. P. 302–312. DOI: 10.1890/14-2070.1.
31. *Sannigrahi S., Basu B., Sarkar Basu A., Pilla F.* Development of automated marine floating plastic detection system using Sentinel-2 imagery and machine learning models // *Marine Pollution Bull.* 2022. V. 178. Article 113527. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113527.
32. *Setiani P., Ramdani F.* Oil spill mapping using multi-sensor Sentinel data in Balikpapan Bay, Indonesia // 2018 4th Intern. Symp. on Geoinformatics (ISyG). 2018. 4 p. DOI: 10.1109/ISYG.2018.8612057.
33. *Shevealy S., Courtney K., Parks J. E.* The Honolulu Strategy: A global framework for prevention and management of marine debris. UNEP, NOAA, 2012. 50 p.
34. *Themistocleous K., Papoutsas C., Michaelides S., Hadjimitsis D.* Investigating detection of floating plastic litter from space using Sentinel-2 imagery // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 16. Article 2648. DOI: 10.3390/rs12162648.
35. *Topouzelis K., Papakonstantinou A., Garaba S. P.* Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018) // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. V. 79. P. 175–183. DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.011.
36. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8. No. 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
37. *Tuzcu Kokal A., Olgun N., Musaoğlu N.* Detection of mucilage phenomenon in the Sea of Marmara by using multi-scale satellite data // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. V. 194. No. 8. Article 585. DOI: 10.1007/s10661-022-10267-6.
38. *Vankayalapati K., Dasari H. P., Langodan S. et al.* Multi-mission satellite detection and tracking of October 2019 Sabiti oil spill in the Red Sea // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 1. Article 38. DOI: 10.3390/rs15010038.

39. Vodeneeva E., Pichugina Y., Zhurova D. et al. Epipelagic algal communities on different types of polymers in freshwater bodies: A short-term experiment in karst lakes // *Water*. 2024. V. 16. No. 22. Article 3288. DOI: 10.3390/w16223288.
40. Waqas M., Wong M. S., Stocchino A. et al. Marine plastic pollution detection and identification by using remote sensing-meta analysis // *Marine Pollution Bull.* 2023. V. 197. Article 115746. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115746.
41. Wilcox C., Van Sebille E., Hardesty B. D. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing // *Proc. National Academy of Sciences*. 2015. V. 112. No. 38. P. 11899–11904. DOI: 10.1073/pnas.1502108112.

Possibilities of using spectral indices for plastic debris identification in satellite multispectral ocean images

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 paper presents a comparative analysis of existing spectral indices obtained from satellite multispectral images of the ocean surface and inland waters in order to identify the most effective ones for detecting floating ocean plastic debris. The analysis is based on satellite multispectral observations of plastic debris from the Sentinel-2 satellite presented in the literature during controlled *in situ* experiments. In addition to comparing the indices with each other in the task of detecting plastic debris, the possibility of distinguishing plastic debris from other surface contaminants, such as wooden fragments, thick biogenic films (sargassum algae, phytoplankton), marine mucilage, oil, etc., is also considered. For the Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) multispectral images, widely used spectral indices were calculated, namely, Floating Debris Index (FDI), Floating Algae Index (FAI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Plastic Index (PI). It is shown that, among the indices, the FAI, rather than the PI, is the most effective for diagnosing plastic debris zones on the water surface. It is noted that the FAI, however, does not allow for unambiguous identification of plastic debris against the background of certain pollution, such as oil, which requires further development of the principles of diagnosing plastic debris in the ocean.

Keywords: plastic debris, water surface, satellite images, multispectral data, Sentinel-2, spectral indices

Accepted: 29.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-274-284

References

1. Danilicheva O. A., Ermakov S. A., On biogenic films manifestations in satellite multispectral images of eutrophic water bodies, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 273–284 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284.
2. Ermakov S. A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Impact of films on the dynamics of gravity-capillary waves), N. Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p. (in Russian).
3. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detection and monitoring marine zones of ecological risks), Moscow: IKI RAS, 2016, 336 p. (in Russian).
4. Basu B., Sannigrahi S., Sarkar Basu A., Pilla F., Development of novel classification algorithms for detection of floating plastic debris in coastal waterbodies using multispectral Sentinel-2 remote sensing imagery, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 8, Article 1598, DOI: 10.3390/rs13081598.

5. Biermann L., Clewley D., Martinez-Vicente V., Topouzelis K., Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data, *Scientific Reports*, 2020, V. 10, Article 5364, DOI: 10.1038/s41598-020-62298-z.
6. Carlson D. F., Suaria G., Aliani S. et al., Combining litter observations with a regional ocean model to identify sources and sinks of floating debris in a semi-enclosed basin: the Adriatic Sea, *Frontiers in Marine Science*, 2017, V. 4, Article 78, DOI: 10.3389/fmars.2017.00078.
7. Chu S., Wang J., Leong G. et al., Perfluoroalkyl sulfonates and carboxylic acids in liver, muscle and adipose tissues of black-footed albatross (*Phoebastria nigripes*) from Midway Island, North Pacific Ocean, *Chemosphere*, 2015, V. 138, pp. 60–66, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.043.
8. Colkesen I., Kavzoglu T., Sefercik U. G., Ozturk M. Y., Automated mucilage extraction index (AMEI): a novel spectral water index for identifying marine mucilage formations from Sentinel-2 imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2023, V. 44, No. 1, pp. 105–141, DOI: 10.1080/01431161.2022.2158049.
9. D’Ugo E., Kallikkattilkuruva A., Giuseppetti R. et al., A Sentinel-2-based system to detect and monitor oil spills: Demonstration on 2024 Tobago accident, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, No. 2, Article 230, DOI: 10.3390/rs17020230.
10. Derraik J. G. B., The pollution of the marine environment by plastic debris: a review, *Marine Pollution Bull.*, 2002, V. 44, No. 9, pp. 842–852, DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
11. Garaba S. P., Harmel T., Top-of-atmosphere hyper and multispectral signatures of submerged plastic litter with changing water clarity and depth, *Optics Express*, 2022, V. 30, No. 10, pp. 16553–16571, DOI: 10.1364/OE.451415.
12. Garaba S. P., Aitken J., Slat B. et al., Sensing ocean plastics with an airborne hyperspectral shortwave infrared imager, *Environmental Science and Technology*, 2018, V. 52, No. 20, pp. 11699–11707, DOI: 10.1021/acs.est.8b02855.
13. Goddijn-Murphy L., Peters S., van Seville E. et al., Concept for a hyperspectral remote sensing algorithm for floating marine macro plastics, *Marine Pollution Bull.*, 2018, V. 126, pp. 255–262, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.011.
14. Hernández-Núñez H., Euán-Avila J. I., Velocity of *Sargassum* migration in the Caribbean observed with Landsat 8/9 and Sentinel 2 A/B imagery, *PLoS ONE*, 2025, V. 20, No. 3, Article e0319391, DOI: 10.1371/journal.pone.0319391.
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, pp. 2118–2129, DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
16. Kikaki K., Kakogeorgiou I., Mikeli P. et al., MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data, *PLoS ONE*, 2022, V. 17, No. 1, Article e0262247, DOI: 10.1371/journal.pone.0262247.
17. Knaeps E., Sterckx S., Strackx G. et al., Hyperspectral-reflectance dataset of dry, wet and submerged marine litter, *Earth System Science Data*, 2021, V. 13, No. 2, pp. 713–730, DOI: 10.5194/essd-13-713-2021.
18. Konik M., Bradtke K., Stoń-Egiert J. et al., Cyanobacteria index as a tool for the satellite detection of cyanobacteria blooms in the Baltic Sea, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 6, Article 1601, DOI: 10.3390/rs15061601.
19. Kremezi M., Kristollari V., Karathanassi V. et al., Pansharpening PRISMA data for marine plastic litter detection using plastic indexes, *IEEE Access*, 2021, V. 9, pp. 61955–61971, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073903.
20. Kremezi M., Kristollari V., Karathanassi V. et al., Increasing the Sentinel-2 potential for marine plastic litter monitoring through image fusion techniques, *Marine Pollution Bull.*, 2022, V. 182, Article 113974, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113974.
21. Kwon B. G., Koizumi K., Chung S.-Y. et al., Global styrene oligomers monitoring as new chemical contamination from polystyrene plastic marine pollution, *J. Hazardous Materials*, 2015, V. 300, pp. 359–367, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.039.
22. Lebreton L., Slat B., Ferrari F. et al., Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic, *Scientific Reports*, 2018, V. 8, Article 4666, DOI: 10.1038/s41598-018-22939-w.
23. Majidi Nezhad M., Groppi D., Laneve G. et al., Oil spill detection analyzing “Sentinel 2” satellite images: A Persian Gulf case study, *Proc. 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE’18)*, 2018, Article AWSPT 134, 8 p., DOI: 10.11159/awspt18.134.
24. Mikeli P., Kikaki K., Kakogeorgiou I., Karantzaos K., How challenging is the discrimination of floating materials on the sea surface using high resolution multispectral satellite data?, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, V. XLIII-B3-2022, pp. 151–157, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-151-2022.
25. Möhlenkamp P., Purser A., Thomsen L., Plastic microbeads from cosmetic products: an experimental study of their hydrodynamic behaviour, vertical transport and resuspension in phytoplankton and sediment aggregates, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2018, V. 6, Article 61, DOI: 10.1525/elementa.317.

26. Moshtaghi M., Knaeps E., Sterckx S. et al., Spectral reflectance of marine macroplastics in the VNIR and SWIR measured in a controlled environment, *Scientific Reports*, 2021, V. 11, Article 5436, DOI: 10.1038/s41598-021-84867-6.
27. Ody A., Thibaut T., Berline L. et al., From In Situ to satellite observations of pelagic *Sargassum* distribution and aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean, *PLoS ONE*, 2019, V. 14, No. 9, Article e0222584, DOI: 10.1371/journal.pone.0222584.
28. Palacios J.S., Remote sensing of marine plastic debris using satellite images off the coast of the Basque Country, <https://www.researchgate.net>, 2024, 29 p.
29. Papageorgiou D., Topouzelis K., Suaria G. et al., Sentinel-2 detection of floating marine litter targets with partial spectral unmixing and spectral comparison with other floating materials (Plastic Litter Project 2021), *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 23, Article 5997, DOI: 10.3390/rs14235997.
30. Rochman C.M., Browne M.A., Underwood A.J. et al., The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived, *Ecology*, 2016, V. 97, No. 2, pp. 302–312, DOI: 10.1890/14-2070.1.
31. Sannigrahi S., Basu B., Sarkar Basu A.S., Pilla F., Development of automated marine floating plastic detection system using Sentinel-2 imagery and machine learning models, *Marine Pollution Bull.*, 2022, V. 178, Article 113527, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113527.
32. Setiani P., Ramdani F., Oil spill mapping using multi-sensor Sentinel data in Balikpapan Bay, Indonesia, 2018 4th Intern. Symp. on Geoinformatics (ISyG), 2018, 4 p., DOI: 10.1109/ISYG.2018.8612057.
33. Shevealy S., Courtney K., Parks J.E., *The Honolulu Strategy: A global framework for prevention and management of marine debris*, UNEP, NOAA, 2012, 50 p.
34. Themistocleous K., Papoutsas C., Michaelides S., Hadjimitsis D., Investigating detection of floating plastic litter from space using Sentinel-2 imagery, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 16, Article 2648, DOI: 10.3390/rs12162648.
35. Topouzelis K., Papakonstantinou A., Garaba S.P., Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018), *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, V. 79, pp. 175–183, DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.011.
36. Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, V. 8, No. 2, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
37. Tuzcu Kokal A., Olgun N., Musaoğlu N., Detection of mucilage phenomenon in the Sea of Marmara by using multi-scale satellite data, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, V. 194, No. 8, Article 585, DOI: 10.1007/s10661-022-10267-6.
38. Vankayalapati K., Dasari H.P., Langodan S. et al., Multi-mission satellite detection and tracking of October 2019 Sabiti oil spill in the Red Sea, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 1, Article 38, DOI: 10.3390/rs15010038.
39. Vodeneeva E., Pichugina Y., Zhurova D. et al., Epiplastic algal communities on different types of polymers in freshwater bodies: A short-term experiment in karst lakes, *Water*, 2024, V. 16, No. 22, Article 3288, DOI: 10.3390/w16223288.
40. Waqas M., Wong M.S., Stocchino A. et al., Marine plastic pollution detection and identification by using remote sensing-meta analysis, *Marine Pollution Bull.*, 2023, V. 197, Article 115746, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115746.
41. Wilcox C., Van Seville E., Hardesty B.D., Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing, *Proc. National Academy of Sciences*, 2015, V. 112, No. 38, pp. 11899–11904, DOI: 10.1073/pnas.1502108112.