



НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61> EDN: JBTDAE

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА ОТРАЖЁННОГО РАДИОСИГНАЛА ОТ ПРИБРЕЖНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Научная статья

Моисеева Н.О.^{1,*}, Александров С.А.², Лукина Ю.Е.³, Моисеев В.А.⁴¹ Санкт-Петербургский Государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Российская Федерация^{2,3} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (natali.ziadinova[at]yandex.ru)

Предложена: 04.03.2026; Принята: 10.04.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В статье предложен спектральный метод обнаружения и количественной оценки нефтяных загрязнений морской поверхности, основанный на анализе изменения спектра отражённого радиосигнала от прибрежных радиолокационных станций при подавлении капиллярно-гравитационных волн нефтяной плёнкой. Метод реализован с использованием адаптированной математической модели радиолокационного анализа, учитывающей физические свойства плёнки и условия берегового рассеяния. Проведено численное моделирование для параметров, характерных для радиолокационных систем X-диапазона, с последующей оценкой зависимости спектральной амплитуды от степени микроволнового сглаживания поверхности. Показано, что амплитуда спектра изменяется немонотонно по мере утолщения плёнки: при определённой толщине достигается максимум чувствительности метода, после чего эффективность снижается из-за насыщения и интерференционных искажений. Построена обобщающая таблица, связывающая физические характеристики плёнки с изменением спектральных параметров, что позволяет применять метод для дистанционного мониторинга уровня загрязнения. Результаты согласуются с современными исследованиями в области радиолокационного, гиперспектрального и инфракрасного зондирования, а предложенный подход может быть реализован на стационарных прибрежных радиолокационных станциях как экономичный инструмент регулярных наблюдений за состоянием окружающей среды и анализа влияния нефтяной плёнки на развитие атмосферных процессов и формирования различных явлений погоды.

Ключевые слова: обнаружение нефтяных загрязнений, атмосферные процессы, явления погоды, спектральный анализ, радиолокация, капиллярно-гравитационные волны, X-диапазон, мониторинг морской поверхности.

DETECTION OF OIL SPILLS ON THE SEA SURFACE BASED ON ANALYSIS OF THE SPECTRUM OF REFLECTED RADIO SIGNALS FROM COASTAL RADAR STATIONS

Research article

Moiseeva N.O.^{1,*}, Aleksandrov S.A.², Lukina Y.Y.³, Moiseev V.A.⁴¹ Saint-Petersburg State University of civil aviation named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, Saint-Petersburg, Russian Federation^{2,3} St Petersburg University, Saint-Petersburg, Russian Federation⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (natali.ziadinova[at]yandex.ru)

Suggested: 04.03.2026; Accepted: 10.04.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The article suggests a spectral method for the detection and quantification of oil pollution on the sea surface, based on the analysis of changes in the spectrum of the reflected radar signal from coastal radar stations when capillary-gravitational waves are suppressed by an oil film. The method is implemented using an adapted mathematical model of radar analysis that takes into account the physical properties of the film and the conditions of Bragg scattering. Numerical simulations were carried out for parameters typical of X-range radar systems, followed by an evaluation of the dependence of the spectral amplitude on the degree of microwave smoothing of the surface. It is shown that the spectral amplitude varies non-monotonically as the film thickens: at a certain thickness, the method's sensitivity reaches a maximum, after which its effectiveness decreases due to saturation and interference distortions. A generalised table has been compiled linking the physical characteristics of the film to changes in spectral parameters, which makes it possible to apply the method for remote monitoring of pollution levels. The results are consistent with recent research in the field of radar, hyperspectral and infrared remote sensing, and the proposed approach can be implemented at fixed coastal radar stations as a cost-effective tool for regular monitoring of environmental conditions and analysis of the impact of oil slicks on atmospheric processes and the formation of various weather phenomena.

Keywords: detection of oil spills, atmospheric processes, weather phenomena, spectral analysis, radar, capillary-gravity waves, X-range, sea surface monitoring.

Введение

Нефтяные загрязнения представляют серьёзную угрозу для морских экосистем, качества водной среды и здоровья человека. Также наличие нефтяной плёнки может оказать местное влияние на газо-, тепло- и влагообмен системы океан-атмосфера, что необходимо учитывать при численном моделировании атмосферных процессов. При прогнозировании таких явлений погоды, как осадки, туман, низкой слоистой облачности, необходимо учитывать, что частицы нефти, попадая в атмосферу могут представлять собой дополнительные ядра конденсации. Актуальность исследования обусловлена высокой уязвимостью прибрежных и мелководных зон, где даже локальные утечки нефти могут привести к долговременным негативным последствиям. В таких районах необходимы непрерывное наблюдение состояния окружающей среды и разработка доступных, надёжных методов обнаружения нефтяной плёнки [1].

Цель настоящей работы заключается в разработке и апробации спектрального метода количественной оценки нефтяных загрязнений морской поверхности, основанного на адаптированной математической модели радиолокационного анализа, ранее применявшейся авторами в иной постановке задачи. Проведённые численные эксперименты показали согласованность предложенного подхода с результатами наблюдений [2], [3].

Метод базируется на ключевом физическом признаке нефтяных плёнок — подавлении капиллярно-гравитационных волн, что приводит к изменению спектральных характеристик отражённого радиосигнала. Эффективность такого подхода подтверждается результатами современных исследований с применением радиолокационного (SAR) зондирования [4], гиперспектрального мониторинга с беспилотных летательных аппаратов [5] и инфракрасного спектрального анализа [6].

Научная новизна работы состоит в применении спектрального анализа для количественного определения характеристик нефтяных плёнок, теоретическая значимость — в адаптации модели к задачам дистанционного мониторинга загрязнённой поверхности, практическая — в возможности реализации метода на стационарных прибрежных радиолокационных станциях как экономичного и локально привязанного инструмента.

Методы и принципы исследования

2.1. Физические основы метода

При попадании нефтепродуктов на морскую поверхность формируется тонкая плёнка, которая подавляет капиллярно-гравитационные волны — основной источник рассеяния в радиолокационном диапазоне *X-band* (около 3 см). Это приводит к снижению отражённой мощности радиосигнала, особенно при углах облучения 30–45°, что обусловлено ростом вязкости и снижением поверхностного натяжения; максимальная чувствительность достигается при условии брегговского рассеяния, когда длина радиоволны соизмерима с длиной поверхностных волн [7].

2.2. Исходные условия численного эксперимента

В рамках численного моделирования были заданы параметры, характерные для прибрежной радиолокационной системы, размещённой на стационарной вышке. Высота антенны составляла 20 метров, углы облучения — 30–45°, что обеспечивает охват участка поверхности длиной около 10 метров. Рабочая частота радара — 10 ГГц (*X-band*). Схема размещения и область облучения представлены на рис. 1.

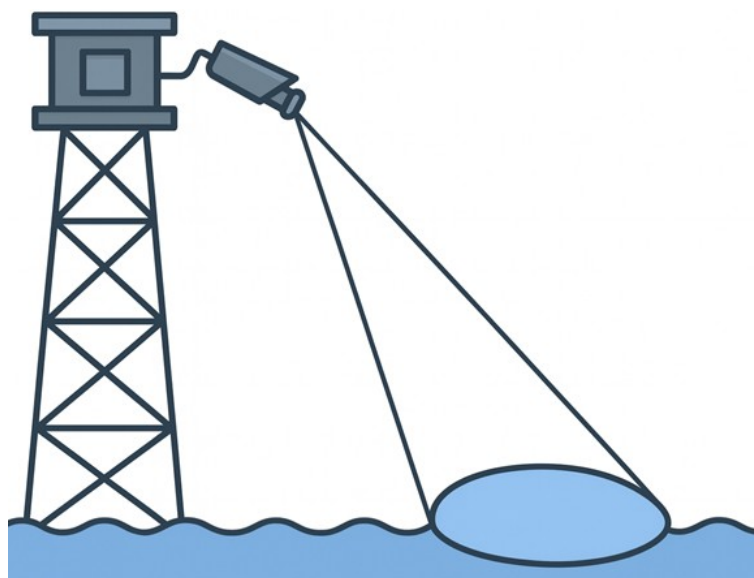


Рисунок 1 - Схема радиолокационного облучения с вышки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61.1>

Для моделирования воздействия загрязнения использовался коэффициент сглаживания, отражающий степень подавления микроволнения плёнкой. Диапазон коэффициента сглаживания k от 1,00 до 0,70 соответствовал различным уровням загрязнения, параметры заданы по [8].

2.3. Математическая модель

Для количественного анализа спектра отражённого сигнала была использована модель, разработанная авторами, в которой морская поверхность представляется как совокупность независимых флуктуирующих рассеивателей,

равномерно распределённых вдоль направления излучения. Шаг между ними определяется из длины облучаемого участка L и числа рассеивателей. Расстояние определяется углом падения излучения. Исходный сигнал моделируется в виде гармонической волны, отражённой от всей поверхности. Суммарный сигнал формируется как суперпозиция откликов от всех рассеивателей с учётом фазовых сдвигов. Его аналитическое выражение имеет следующий вид:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} \cos \left(\left(\omega t - \frac{\omega}{c} \left(\frac{n \cdot \delta \cdot \cos(\theta_0)}{\sin(\theta'_n)} + r_n(t) \right) \right) \right), \quad (1)$$

где ω — круговая частота сигнала;

c — скорость распространения электромагнитной волны;

δ — шаг между рассеивателями;

θ_0 — минимальный угол облучения;

θ'_n — угол n -му рассеивателю;

$r_n(t)$ — флуктуационное отклонение n -го рассеивателя.

Для перехода к спектру мощности используется автокорреляционная функция и теорема Винера–Хинчина. Влияние учитывается коэффициентом сглаживания. Значения k и соответствующие им характеристики плёнки были заданы по данным [8].

Основные результаты

Для первичной оценки влияния загрязнения на отражённый радиосигнал была выполнена серия численных экспериментов, сравнивающих спектр при наличии нефтяной плёнки и в условиях чистой воды. На рис. 2 представлены спектры в двух случаях: эталон (без загрязнения) и загрязнённая поверхность при коэффициенте сглаживания $k = 0,95$, соответствующем умеренному загрязнению.

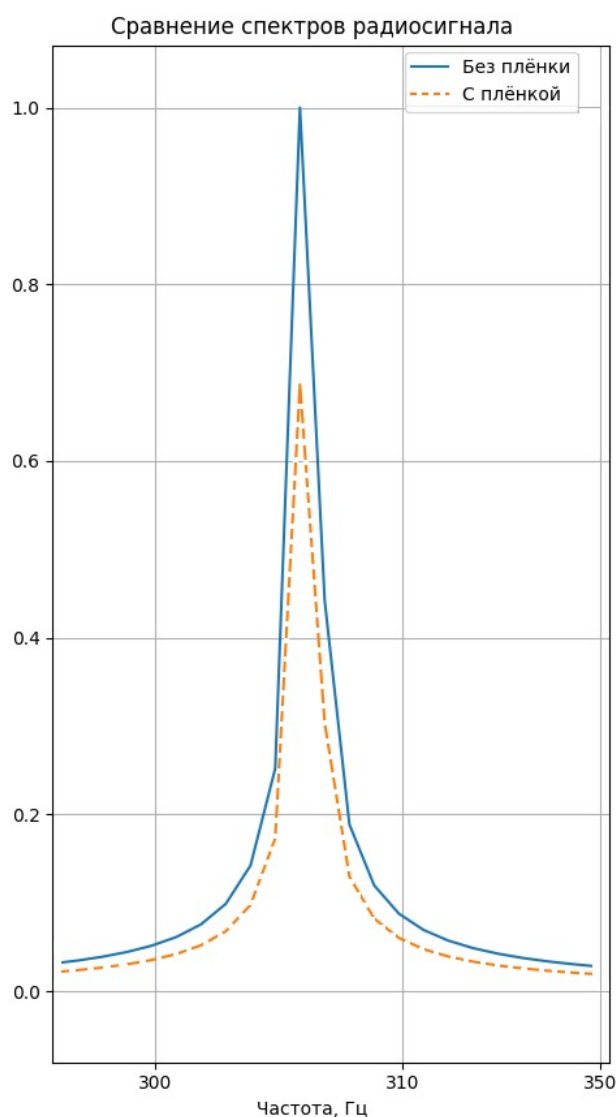


Рисунок 2 - Подавление высокочастотных компонент спектра при наличии нефтяной плёнки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61.2>

Плёнка снижает амплитуду спектра вблизи основной частоты и способствует дополнительному ослаблению его высокочастотных компонент. Это подтверждает чувствительность спектрального подхода к присутствию нефтяных загрязнений.

Для более детального анализа проведено параметрическое исследование зависимости спектральной амплитуды от степени сглаживания поверхности. Это позволяет установить, как различные уровни загрязнения влияют на отражённый сигнал в спектральной области.

На рис. 3 представлена нормализованная амплитуда спектра в зависимости от коэффициента сглаживания k , моделирующего степень микроволнового подавления.

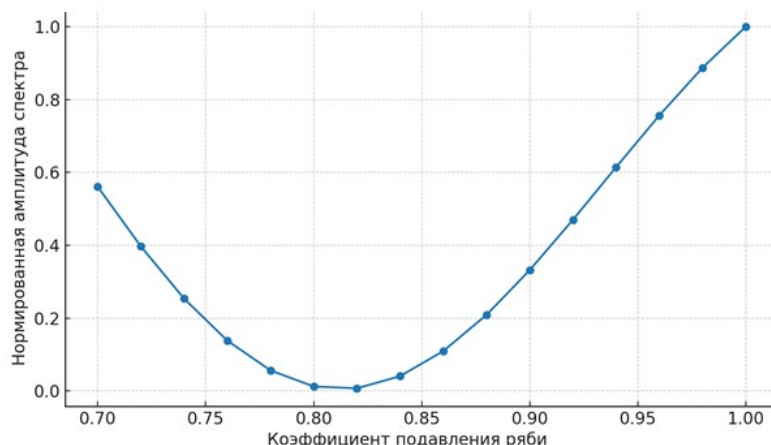


Рисунок 3 - Зависимость амплитуды спектра от коэффициента сглаживания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61.3>

График демонстрирует немонотонную зависимость: при снижении значения k от 1,00 до $\approx 0,80$ амплитуда спектра резко падает, достигая минимума, а затем частично восстанавливается. Это указывает на нелинейный характер взаимодействия радиоволн с загрязнённой поверхностью. При $k < 0,75$, соответствующем очень толстой плёнке (более 6 мкм), эффективность спектрального метода снижается из-за эффекта насыщения и интерференционных искажений. Подобные ограничения описаны в [9], где показано, что при больших толщинах чувствительность спектрального анализа падает.

Для получения количественного соответствия между уровнем сглаживания и физическими характеристиками загрязнения была построена табл. 1. Она объединяет результаты численного моделирования спектральной амплитуды с данными из работы [8], где установлена зависимость между коэффициентом подавления ряби и толщиной плёнки. На основе этой связи удалось отразить, как изменение k влияет одновременно и на спектр отражённого сигнала, и на физическую структуру загрязнения.

Таблица 1 - Соответствие толщины плёнки и коэффициента подавления ряби

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61.4>

Коэффициент подавления ряби	Примерная толщина нефтяной плёнки, мкм	Характеристика плёнки	Нормализованная амплитуда спектра (по данным графика)
1,00	0	Чистая вода, без загрязнения	1,00
0,97	0,5–1	Очень тонкая плёнка, минимальное воздействие	$\approx 0,87$
0,95	1–2	Начало подавления капиллярных волн	$\approx 0,75$
0,90	2–3	Умеренное подавление	$\approx 0,55$
0,85	3–4	Существенное снижение микроволнения	$\approx 0,40$
0,80	4–5	Почти полное подавление капиллярных волн	$\approx 0,05$
0,78	5–6	Плотная нефтяная	$\approx 0,03$

Коэффициент подавления ряби	Примерная толщина нефтяной плёнки, мкм	Характеристика плёнки	Нормализованная амплитуда спектра (по данным графика)
		плёнка	
0,75	6–7	Толстая плёнка, близка к максимальному затуханию	$\approx 0,15$
0,70	≥ 8	Очень толстая/вязкая плёнка, сильное затухание	$\approx 0,55$ (возможно, локальный минимум)

Как видно из таблицы, наиболее выраженное затухание отражённого сигнала наблюдается при $k \approx 0,80$, что соответствует толщине плёнки порядка 4–5 мкм. Именно в этом диапазоне достигается максимум чувствительности метода, поскольку капиллярные волны максимально подавлены, а интенсивность отражения радиоволн от поверхности минимальна. При дальнейшем снижении k , несмотря на увеличение толщины плёнки, амплитуда спектра начинает возрастать, что связано с потерей чувствительности спектрального метода. Такой эффект подтверждает, что метод надёжно работает лишь в ограниченном диапазоне: при слишком тонкой плёнке влияние на спектр слабо выражено, а при чрезмерной толщине — спектральная картина искажается из-за насыщения и интерференции, как показано в [9], [10].

Заключение

В работе представлен спектральный метод количественной оценки нефтяных загрязнений на морской поверхности, основанный на подавлении капиллярно-гравитационных волн. Разработанная модель позволила численно воспроизвести спектр отражённого сигнала при различных уровнях загрязнения и выявить ключевой диапазон чувствительности метода — при коэффициенте сглаживания $k \approx 0,80$, соответствующем толщине плёнки 4–5 мкм. Полученные зависимости спектральной амплитуды согласуются с результатами современных исследований и отражают нелинейную природу взаимодействия радиоволн с загрязнённой поверхностью. Итоговая таблица связывающая коэффициент подавления с физическими параметрами плёнки, подтверждает, что метод позволяет оценивать степень загрязнения на основе радиолокационных данных. При этом зафиксированы ограничения спектрального подхода: при избыточной толщине наблюдается эффект насыщения, приводящий к снижению чувствительности. Метод может применяться на прибрежных радиолокационных станциях для организации непрерывных наблюдений за состоянием окружающей среды в целях обеспечения экологической безопасности, а также исследования влияния нефтяных пленок на развитие атмосферных процессов и формирования различных явлений погоды.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61.5>

Review

Community of Reviewers of the International Research Journal

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.61.5>

Список литературы / References

1. Князев Н.А. Спутниковый радиолокационный мониторинг нефтяных загрязнений в акватории Анапа — Геленджик за период 2018–2020 гг.: Океанологические исследования / Н.А. Князев, О.Ю. Лаврова, А.Г. Костяной. — Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. — Т. 49. — 23 с. — DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8
2. Бескид П.П. Результаты исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений водной поверхности, проводимых в РГГМУ / П.П. Бескид, П.Ю. Богданов, В.А. Микулин и др. // Гидрометеорология и экология. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2020. — Вып. 60. — С. 371–391. — DOI: 10.33933/2074-2762-2020-60-371-391
3. Yang Y. Oil Film Detection for Marine Radar Image Using SBR Feature and Adaptive Threshold / Y. Yang, J. Yan, J. Xu et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — № 6. — P. 1178. — DOI: 10.3390/jmse13061178
4. Матросова Е.Р. Определение характеристик естественных нефтепроявлений и их подводных источников по данным дистанционного зондирования / Е.Р. Матросова, В.Н. Ходаева, А.Ю. Иванов // Исследование Земли из Космоса. — 2022. — № 2. — С. 3–27. — DOI: 10.31857/S0205961422020063
5. Jiang L. Hyperspectral remote sensing detection of marine oil spills using 1D-CNN and adaptive learning techniques from UAV imagery / L. Jiang, X. Chen, Y. Zhang et al. // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — № 5. — Article ID: 954. — DOI: 10.3390/rs13050954
6. Yang J. Identification of marine oil spill pollution using hyperspectral and thermal infrared remote sensing / J. Yang, Z. Liu, Y. Hiu et al. // Frontiers in Marine Science. — 2023. — Vol. 10. — Article ID: 1135356. — DOI: 10.3389/fmars.2023.1135356



7. Марченко М.О. Результаты спутникового радиолокационного мониторинга нефтяных разливов с судов в Татарском проливе Японского моря Научные труды Дальрыбвтуза / М.О. Марченко, Р.С. Бессонов, В.А. Дубина и др. — Владивосток: Дальрыбвтуз, 2023. — Т. 65. — 9 с. doi: 10.48612/dalrybvtuz/2023-65-10

8. Ermakov S.A. Strong Modulation of Short Wind Waves and Ka-Band Radar Return Due to Internal Waves in the Presence of Surface Films. Theory and Experiment / S.A. Ermakov, I.A. Sergievskaya, I.A. Kapustin // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — № 13. — Article ID: 2462. — DOI: 10.3390/rs13132462

9. Li D. Investigation of Electromagnetic Scattering Mechanisms from Dynamic Oil Spill–Covered Sea Surface / D. Li, Z. Zhao, W. Ma et al. // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — № 7. — Article ID: 1777. — DOI: 10.3390/rs15071777

10. Yang J. Combined Retrieval of Oil Film Thickness Using Airborne Hyperspectral and Thermal Infrared Remote Sensing / J. Yang, R. Wang, D. Li et al. // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — № 22. — Article ID: 5415. — DOI: 10.3390/rs15225415

Список литературы на английском языке / References in English

1. Knyazev N.A. Sputnikovii radiolokatsionnii monitoring neftyanikh zagryaznenii v akvatorii Anapa — Gelendzhik za period 2018–2020 gg [Satellite radar monitoring of oil pollution in the Anapa — Gelendzhik waters for the period 2018–2020]: Oceanographic research / N.A. Knyazev, O.Yu. Lavrova, A.G. Kostyanov. — Moscow: P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, 2021. — Vol. 49. — 23 p. — DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8 [in Russian]

2. Beskid P.P. Rezultati issledovaniy v oblasti distantsionnykh metodov obnaruzheniya neftyanikh zagryaznenii vodnoi poverkhnosti, provodimikh v RGGMU [Results of research in the field of remote methods for detecting oil pollution of the water surface, conducted at the RStt HMU] / P.P. Beskid, P.Yu. Bogdanov, V.A. Mikulin et al. // Hydrometeorology and ecology. — Saint Petersburg: RGGMU, 2020. — Iss. 60. — P. 371–391. — DOI: 10.33933/2074-2762-2020-60-371-391 [in Russian]

3. Yang Y. Oil Film Detection for Marine Radar Image Using SBR Feature and Adaptive Threshold / Y. Yang, J. Yan, J. Xu et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — № 6. — P. 1178. — DOI: 10.3390/jmse13061178

4. Matrosova E.R. Opredelenie xarakteristik estestvenny'x nefteproyavlenij i ix podvodny'x istochnikov po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Characterization of natural oil seeps and their underwater sources using remote sensing data] / E.R. Matrosova, V.N. Xodaeva, A.Yu. Ivanov // Exploring the Earth from Space. — 2022. — № 2. — P. 3–27. — DOI: 10.31857/S0205961422020063 [in Russian]

5. Jiang L. Hyperspectral remote sensing detection of marine oil spills using 1D-CNN and adaptive learning techniques from UAV imagery / L. Jiang, X. Chen, Y. Zhang et al. // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — № 5. — Article ID: 954. — DOI: 10.3390/rs13050954

6. Yang J. Identification of marine oil spill pollution using hyperspectral and thermal infrared remote sensing / J. Yang, Z. Liu, Y. Hiu et al. // Frontiers in Marine Science. — 2023. — Vol. 10. — Article ID: 1135356. — DOI: 10.3389/fmars.2023.1135356

7. Marchenko M.O. Rezul'taty' sputnikovogo radiolokatsionnogo monitoringa neftny'x razlivov s sudov v Tatarskom prolyve Yaponskogo morya [Results of satellite radar monitoring of oil spills from ships in the Tatar Strait of the Sea of Japan] Scientific works of the Far Eastern Technical University of Fisheries / M.O. Marchenko, R.S. Bessonov, V.A. Dubina et al. — Vladivostok: Dal'ry'bvtuz, 2023. — Vol. 65. — 9 p. doi: 10.48612/dalrybvtuz/2023-65-10 [in Russian]

8. Ermakov S.A. Strong Modulation of Short Wind Waves and Ka-Band Radar Return Due to Internal Waves in the Presence of Surface Films. Theory and Experiment / S.A. Ermakov, I.A. Sergievskaya, I.A. Kapustin // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — № 13. — Article ID: 2462. — DOI: 10.3390/rs13132462

9. Li D. Investigation of Electromagnetic Scattering Mechanisms from Dynamic Oil Spill–Covered Sea Surface / D. Li, Z. Zhao, W. Ma et al. // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — № 7. — Article ID: 1777. — DOI: 10.3390/rs15071777

10. Yang J. Combined Retrieval of Oil Film Thickness Using Airborne Hyperspectral and Thermal Infrared Remote Sensing / J. Yang, R. Wang, D. Li et al. // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — № 22. — Article ID: 5415. — DOI: 10.3390/rs15225415