

Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором

А.В. Ермошкин, И.А. Капустин

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований проявления и временной динамики пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) на радиолокационных панорамах взволнованной водной поверхности, проведенных на Горьковском водохранилище. В качестве радиолокационного средства использовался морской навигационный радиолокатор, работающий в X-диапазоне на горизонтальной поляризации излучения. Разлив спиртового раствора чистой олеиновой кислоты, имитирующего поверхностное загрязнение, осуществлялся с плавучей лаборатории “Геофизик”. В ходе натурного эксперимента использовалась возможность детектирования пленок ПАВ по данным морских навигационных радиолокаторов (горизонтальная поляризация, малые углы скольжения). В результате предложенного способа обработки радиолокационных панорам удается выделять область, занятую сликом, и определять ее геометрические параметры. Обработка данных позволила исследовать временную динамику растекания искусственного пленочного слика, которая на начальной стадии находится в хорошем согласии с классической теорией Фейя (Fay, 1969) под действием сил поверхностного натяжения при растекании в направлении, совпадающем с генеральным направлением ветра. При растекании пленок ПАВ в направлении, поперечном к ветру, наблюдается отличие от классической теории. Результаты работы могут быть использованы для построения теоретического описания растекания пленок поверхностно-активных веществ при слабых ветрах и течениях, наблюдаемых на внутренних водоемах.

Ключевые слова: поверхностно-активные пленки, морская поверхность, пленочные загрязнения, гравитационно-капиллярные волны, навигационная РЛС

Введение

Проблеме дистанционного зондирования морской поверхности посвящено множество отечественных и зарубежных работ (см., например, (Лаврова и др., 2011)). Такой интерес связан как с интенсивным развитием измерительной аппаратуры, в том числе для установки на искусственных спутниках Земли, так и с особой важностью проблемы загрязнения вод Мирового океана – необходимостью разработки новых методов дистанционного мониторинга загрязнений и приповерхностных процессов в океане. В значительной части работ, посвященных детектированию пленочных загрязнений на морской поверхности (сликов), используются данные активного дистанционного зондирования в СВЧ-диапазоне, такие как данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) (Лаврова и др., 2013), базирующихся на самолетах и спутниках, а также данные морских навигационных радиолокационных станций (РЛС), установленных на нефтяных платформах и судах. Последние позволяют исследовать динамику поверхностного загрязнения. Детектирование пленок ПАВ с помощью навигационных РЛС в последнее время занимает важное место в экологическом мониторинге деятельности нефтедобывающих морских платформ. Такие известные коммерческие системы, как MIROS и sigma S6, успешно выполняют задачу обнаружения нефтяных загрязнений в морских условиях (<http://www.miros.no/>, <http://rutter.ca/sigma-s6>).

Известно, что пленки ПАВ становятся видимыми на радиолокационных изображениях морской поверхности, получаемых в СВЧ-диапазоне, благодаря гашению ими опре-

деленного участка спектра ветровых волн. Существуют модели, позволяющие оценивать радиолокационные контрасты для разных типов ПАВ (Ермаков, 2010).

Исследование динамики пленок ПАВ представляет большой интерес, связанный с необходимостью обнаружения загрязнений на морской поверхности (например, нефтяных разливов), прогнозированием вероятных сценариев дальнейшего развития ситуации и необходимостью идентификации вещества загрязнителя. Важнейшим и наиболее простым, с точки зрения определения, параметром пленочных сликов является их характерный размер (Gade et al., 2006). Общепринятые теоретические модели разделяют процесс растекания пятен на характерные временные отрезки (режимы растекания). Каждый режим растекания соответствует тому или иному физическому механизму (Fay, 1969). В настоящей работе рассматривается динамика растекания искусственного слика в режиме поверхностного натяжения (при низкой поверхностной концентрации ПАВ) в натуральных условиях в ходе экспедиционных работ на Горьковском водохранилище.

Условия эксперимента

Экспериментальные исследования были проведены на Горьковском водохранилище 26 августа 2014 г. в районе аванпорта. Метеорологическая обстановка фиксировалась при помощи метеостанции Vantage Pro 2 фирмы Davis Instruments. Во время проведения эксперимента наблюдался юго-западный ветер со скоростью 4 м/с. Температура воздуха оставалась постоянной, около 17,7 градусов Цельсия (рис. 1).

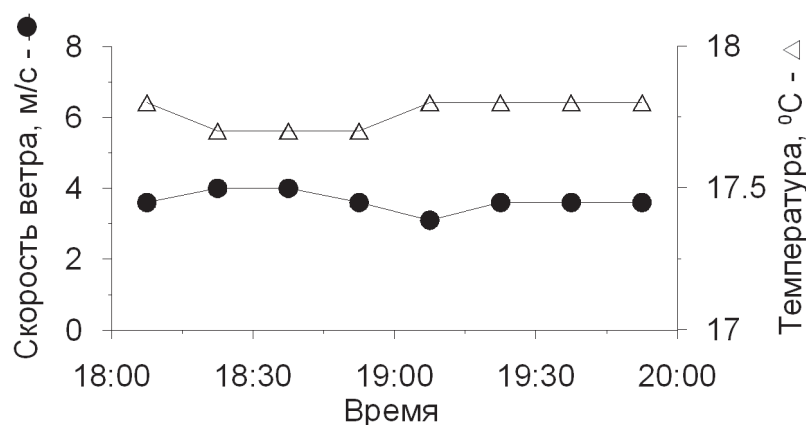


Рис. 1. Скорость ветра и температура воздуха на высоте 12 м за время проведения эксперимента

Измерительная аппаратура была установлена на маяке аванпорта на высоте 12 м от поверхности воды. РЛС Icom MR-1200 обладала следующими техническими характеристиками: мощность излучения 4 кВт, частота излучения 9,4 ГГц, горизонтальная поляризация излучения и приема, ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости 22°, в горизонтальной плоскости 4°. РЛС работала в режиме кругового обзора синхронно с видеокамерой GoPro с 17:30 до 20:00.

Разлив пятна осуществлялся с плавучей лаборатории ИПФ РАН “Геофизик” в 18:38 на удалении 450 метров западнее от маяка. В качестве ПАВ, имитирующего поверхностное загрязнение, использовался спиртовой раствор чистой олеиновой кислоты (1:1), общий объем разлитого ПАВ составил 0,75 литра. Олеиновая кислота имеет плотность $0,9 \text{ г/см}^3$, поверхностное натяжение пленки на воде около 40 мН/м , растворяется/смешивается с этанолом. Разлив ПАВ осуществлялся при движении судна по спирали, начальная площадь пятна составила $1,3 \times 10^4 \text{ м}^2$, что соответствует толщине пленки $6 \times 10^{-8} \text{ м}$, далее растекание идет до мономолекулярного слоя 10^{-9} м . Средняя скорость перемещения центра сгустка составила 7 см/с , что соответствует скорости течения в данном районе по результатам предыдущих измерений.

Анализ экспериментальных данных

Эффект гашения коротковолновой части спектра ветрового волнения пленочными загрязнениями приводит к появлению контраста, отличного от фонового значения, на радиолокационных изображениях поверхности водоема. В случае зондирования под скользящими углами условиям брэгговского резонансного рассеяния удовлетворяет поверхностная волна с длиной $\lambda = \lambda_r / 2$, равной $1,6 \text{ см}$, где λ_r – длина волны излучения равная $3,2 \text{ см}$. Работа (Ермошкин и др., 2015) посвящена описанию модели рассеяния радиолокационного сигнала при скользящих углах зондирования. На *рис. 2а* приведена фотография сгустка на поверхности Горьковского водохранилища. В области, занятой пятном, наблюдается выглаживание коротких ветровых волн. Радиолокационная (РЛ) панорама, соответствующая по времени фотографии на *рис. 2а*, приведена на *рис. 2б*. Яркие полосы и пятна соответствуют повышенному отражению от конструкций мола и берега, а также от проходящих судов. Размер радиолокационного изображения, наложенного на карту интернет сервиса maps.yandex.ru, составляет $2 \times 2 \text{ км}$. ПАВ разливалось западнее маяка (место установки РЛС в центре *рис. 2б*), с течением времени пятно трансформировалось и смещалось в сторону аванпорта.

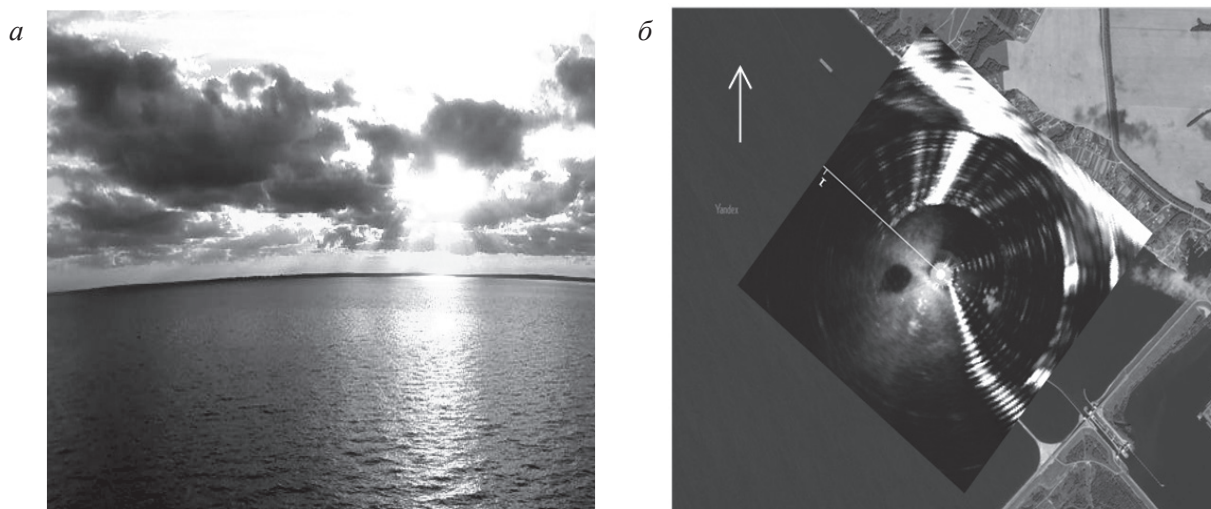


Рис. 2. Сгусток на поверхности Горьковского водохранилища на фотографии (а) и на радиолокационной панораме (б). Белая стрелка указывает направление на север

Для детального анализа динамики слика на РЛ панораме выбиралась область $600 \times 600 \text{ м}^2$, радиолокационный сигнал в которой нормировался на фоновые значения интенсивности рассеяния. В результате данной обработки угловая зависимость рассеяния полностью исчезает, остаются лишь флуктуации сигнала, связанные с отражением от ветрового волнения, и область искусственного слика становится хорошо различимой. Нормированная РЛ панорама приведена на *рис. 3а*. Последующая обработка заключалась в выделении площади РЛ панорамы со значениями ниже некоторого порогового.

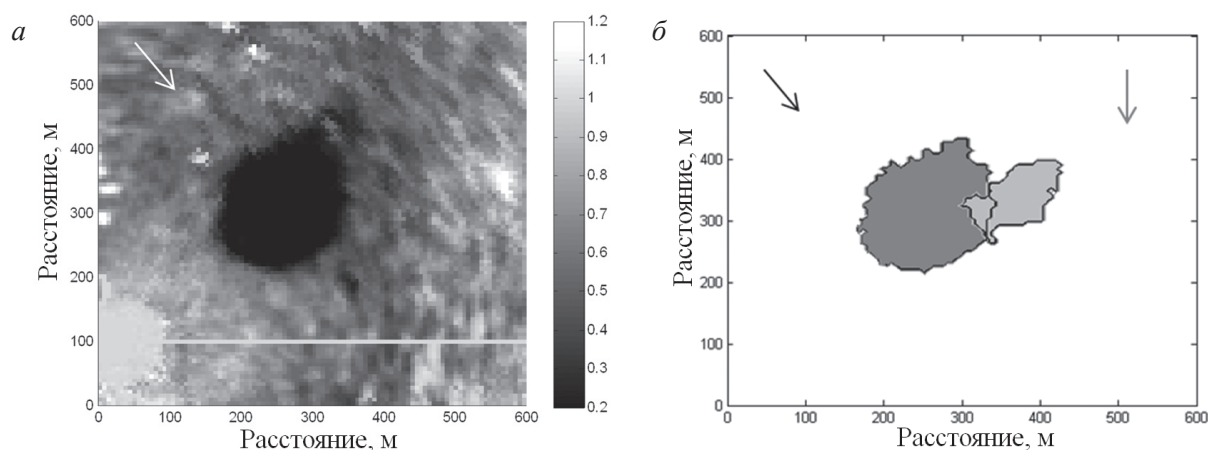


Рис. 3. Нормированная РЛ панорама, полученная через 30 минут после разлива – (а). Черно-белая шкала определяет РЛ контраст. Белая стрелка указывает направление на север. (б) – Контуры сликового пятна по данным РЛС на разных временах после разлива. Светло-серый цвет – 7 минут, серый цвет – 30 минут. Черная стрелка – направление на север, серая стрелка – направление ветра

Контуры двух пятен в разные моменты времени приведены на *рис. 3б*. На начальном этапе площадь слика увеличивалась, и центр смещался в направлении практически перпендикулярном к ветру. Направление смещения центра слика, вероятно, связано с течениями в данном районе.

Для анализа динамика загрязнения рассмотрим зависимость размера пятна вдоль и поперек ветра от времени (*рис. 4а*). Наблюдается растекание вещества пленки, увеличение размеров пятна как по ветру, так и поперек ветра. Однако растекание по ветру происходит быстрее, нежели в поперечном направлении. На *рис. 4а, 4в* приведены аппроксимации для растекания в режиме поверхностного натяжения. В направлении ветра размер слика увеличивается пропорционально $t^{3/4}$, где t – время, что находится в соответствии с (Fau, 1969) (*рис. 4б*). В поперечном ветру направлении растекание происходит медленнее по закону близкому к $t^{1/2}$ (*рис. 4в*).

Более медленное, чем в теории Фея ($\sim t^{3/4}$), растекание поперек ветра наблюдается в эксперименте впервые и пока не имеет теоретического объяснения. Это наблюдение противоречит имеющимся представлениям о сохранении (постоянства) отношения осей эллиптического слика на стадии растекания в режиме поверхностного натяжения при слабых ветрах (Ермаков и др., 2010). Однако следует отметить, что в недавней работе (Ermakov et al., 2015) предложен теоретический подход к разрешению проблемы растекания на завершаю-

щих стадиях, который описывает непостоянство отношения осей слайка. Авторы планируют дальнейший, более глубокий, анализ экспериментальных данных, в том числе на более поздних стадиях растекания, и сравнение результатов с теоретической моделью, развитой в работе (Ermaikov et al., 2015).

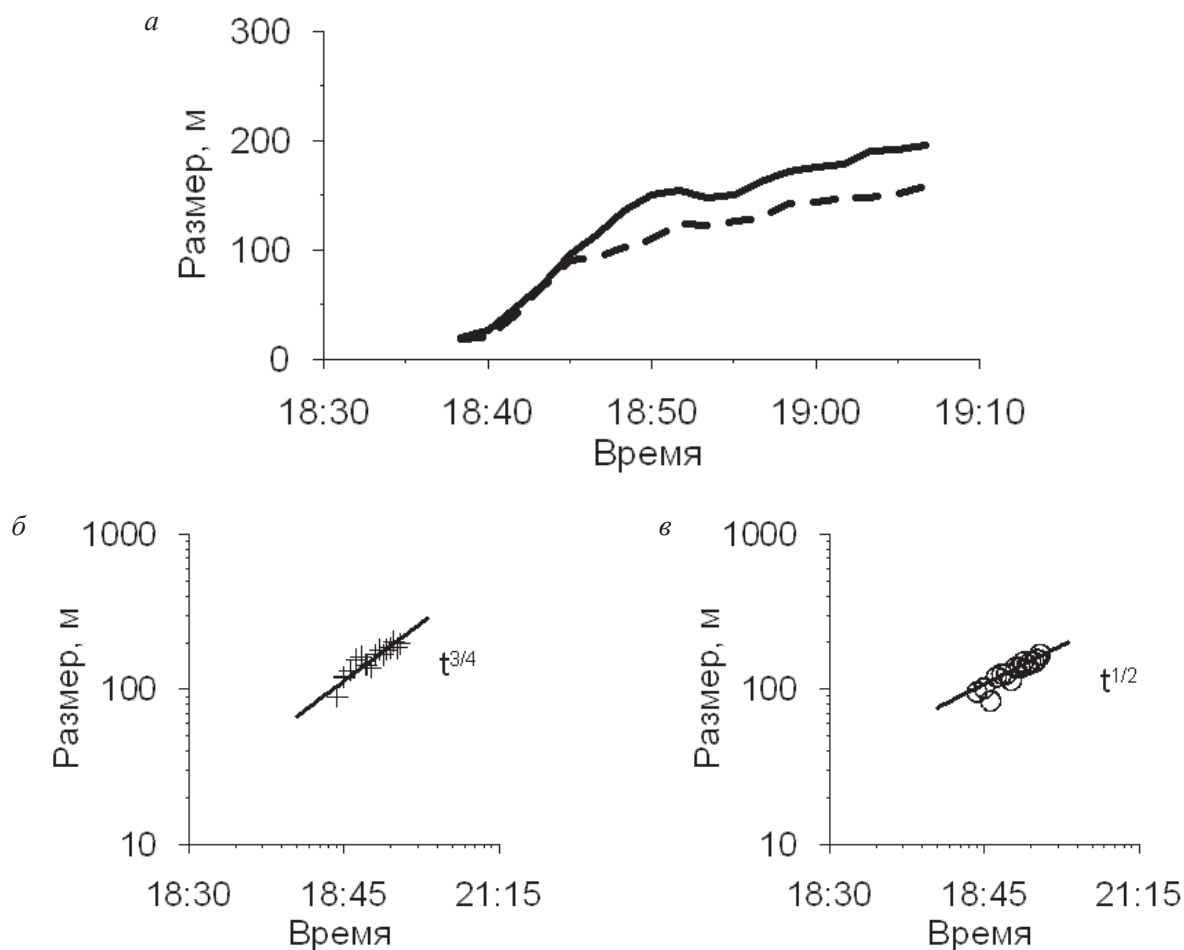


Рис. 4. Зависимость размера пятна в направлении ветра (сплошная линия) и против ветра (штриховая линия) от времени – (а). Аппроксимация растекания пятна в направлении ветра (б) и поперек ветра (в)

Заключение

В ходе натурного эксперимента наглядно продемонстрирована возможность обнаружения пленочных загрязнений морской поверхности с использованием морских навигационных радиолокаторов СВЧ-диапазона, работающих на горизонтальной поляризации излучения и при скользких углах падения. С помощью такого типового навигационного радиолокатора исследована временная динамика (процесс растекания) искусственного пленочного слайка с известными характеристиками гашения коротких ветровых волн. Получена согласующаяся с теоретической моделью зависимость увеличения характерного размера слайка со временем в направлении, совпадающем с генеральным направлением ветра.

Следует также отметить, что в направлении, поперечном к ветру, растекание идет по другому закону, близкому к $t^{1/2}$, что впервые показано в данной работе и нуждается в теоретическом описании.

Авторы выражают глубокую благодарность С.А. Ермакову за обсуждение статьи и ценные замечания. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-35-20992 мол_а_вед, 14-05-31535 мол_а, 14-05-00876 а.

Литература

1. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н.Новгород: ИПФ РАН. 2010. 164 с.
2. Ермаков С.А., Сергеевская И.А., Капустин И.А., Макаров Е.В., Малиновский В.В., Кориненко А.Е.. Растекание и дрейф пленок в поле ветра и течений. Натурные эксперименты с океанографической платформы МГИ НАНУ // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. «К 30-летию океанографической платформы в Кадивели» НАН Украины: МГИ, ИГН, ОФИНБЮМ. Севастополь. 2010. Вып. 21. С. 117–122.
3. Ермошкин А.В., Баханов В.В., Богатов Н.А. Развитие эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов взволнованной водной поверхностью при скользящих углах наблюдения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 51–59.
4. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 2011. 470 с.
5. Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
6. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J. Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms. Proc. SPIE 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. 963807 (October 14, 2015). doi: 10.1117/12.2195004.
7. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // Hoult, D.P. (ed.), Oil on the Sea. Plenum New York. 1969. P. 53–63.
8. Gade M., Huehnerfuss H., Korenowski G. Marine surface films. Springer. 2006. 341 p.

Investigation of surfactant spreading over the surface of internal fresh-water reservoir using marine navigation radar

A.V. Ermoshkin, I.A. Kapustin

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod, 603950, Russia
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru*

The paper presents the results of experimental studies of appearance and temporal dynamics of surface-active substances (surfactants) on radar panoramas of wavy water surface carried out at the Gorky reservoir of the Volga River. Marine navigation radar operating in X-band at horizontal polarization radiation was used. Spilling alcohol solution of pure oleic acid simulating surface contamination was carried out with the floating lab “Geophysicist”. As a result of the proposed method of processing of radar panoramas it is possible to highlight the area occupied by the slick and to determine its geometrical parameters. Data processing allowed us to investigate the temporal dynamics of spreading of the artificial slick film, which at the initial stage was in good agreement with the classical theory of Fay (Fay, 1969) in the mode of surface tension when spreading in the direction coinciding with the direction of the wind. When the film spread in the direction transverse to the wind direction, a deviation from the classical theory was observed.

Keywords: surfactants, oil spills, sea surface, gravity-capillary waves, navigation radar

References

1. Ermakov S.A. *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves), N.Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p.
2. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A., Makarov E.V., Malinovskij V.V., Korinenko A.E. Rastekanie i drejff plenok v pole vetra i techenij. *Naturnye eksperimenty s okeanograficheskoj platformy MGI NANU. Ekologicheskaya bezopasnost pribreghnoj i shelfovoj zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa. Sb. nauch. tr. «K 30-letiyu okeanograficheskoj platformy v Katziveli» NAN Ukrainy: MGI, IGN, OFInBYUM, Sevastopol, 2010, No. 21, pp. 117–122.*
3. Ermoshkin A.V., Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Razvitie empirico-teoreticheskoy modeli rasseyaniya radiolokacionnih signalov vzvolnovannoy vodnoy poverhnostiu pri skolzyaschih uglah zondirovaniya (Development of an empirical model for radar backscattering cross section of the ocean surface at grazing angles), *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 51–59.
4. Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
5. Lavrova O.Yu., Serebryany A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnyx gidrodinamicheskikh processov v severo-vostochnoj chasti Chernogo morya (Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.
6. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya, J. da Silva, Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms, *Proc. SPIE 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, 963807 (October 14, 2015), doi: 10.1117/12.2195004.
7. Fay, J.A., The spread of oil slicks on a calm sea, In: Hoult, D.P. (ed.), *Oil on the Sea*, Plenum New York, 1969, pp. 53–63.
8. Gade M., Huehnerfuss H., Korenowski G. *Marine surface films*, Springer, 2006, 341 p.