

## Наблюдения локализации пластикового мусора в ветровых полосах на водной поверхности

О. А. Даниличева<sup>1</sup>, С. А. Ермаков<sup>1,2</sup>, Г. В. Лещев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*  
*E-mails: olgadan@ipfran.ru, stas.ermakov@ipfran.ru, georgeleshev@ipfran.ru*

<sup>2</sup> *Волжский государственный университет водного транспорта*  
*Нижний Новгород, 603950, Россия*

Настоящая работа нацелена на изучение эффекта локализации пластикового мусора в ветровых полосах как по данным анализа мультиспектральных изображений Каспийского моря со спутника Sentinel-2, так и по результатам специальных модельных экспериментов, выполненных на Горьковском водохранилище, в ходе которых моделировались процессы вовлечения плавающих в приповерхностном слое воды пластиковых объектов в области конвергенции циркуляций Ленгмюра. На основе анализа спутниковых мультиспектральных данных и расчётов распределения пластикового индекса PI (*англ.* Plastic Index) проиллюстрирован эффект локализации пластикового мусора в ветровых полосах, связанных с циркуляцией Ленгмюра. С использованием данных специальных экспериментов с имитаторами пластикового мусора показано, что пластиковый мусор ориентируется вдоль ветра, локализуясь в ветровых полосах за время порядка 10–20 мин, которое предположительно зависит от скорости ветра. Полученные результаты хорошо согласуются с данными наблюдений скорости в циркуляциях Ленгмюра, представленными в литературе.

**Ключевые слова:** пластиковый мусор, циркуляции Ленгмюра, ветровые полосы, водная поверхность

Одобрена к печати: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-205-211

### Введение

Как известно, в приповерхностном слое океана регулярно наблюдаются, в том числе с судов и аэрокосмических носителей, области поверхности, в которых сосредоточен пластиковый мусор (ПМ), водоросли, пена и пр. Очевидно, что области скопления ПМ связаны с наличием зон конвергентных морских течений, и изучение особенностей процессов скопления мусора, в том числе пластикового, в поле переменных течений является важной задачей с точки зрения экологического мониторинга океана и внутренних водоёмов. На актуальность проблемы указывает целый ряд публикаций, в которых представлены результаты исследований загрязнения океана и внутренних водоёмов пластиком (Cózar et al., 2014, 2021; Eriksen et al., 2014; Law et al., 2010; van Sebille et al., 2015). Скопления ПМ могут быть связаны с внутренними волнами (Cózar et al., 2021), фронтальными зонами (Acha et al., 2003; Suaria et al., 2021), а также, что наблюдается весьма часто, с «ветровыми полосами», связанными с циркуляциями Ленгмюра (Chang et al., 2019).

Ветровые полосы — наиболее распространённая и хорошо наблюдаемая особенность поверхностного слоя океана, морей и внутренних водоёмов. Они представляют собой квазипериодические полосовые структуры на поверхности воды, ориентированные приблизительно по направлению ветра, которые наблюдаются за счёт скопления в них пены, плёнок и поверхностного мусора. Такие полосы могут объясняться наличием струйных течений с конвергентными поперечными компонентами, такими как циркуляции Ленгмюра (Van Roekel et al., 2012). Как известно, размеры ветровых полос обычно составляют единицы — десятки метров, а длина — порядка  $10^2$ – $10^3$  м (Carlson et al., 2018; Law et al., 2014).

Согласно современным теоретическим моделям, циркуляции Ленгмюра представляют собой роликовые структуры, образование которых становится следствием взаимодействия

между сдвиговым течением, вызванным ветром, и дрейфом Стокса, вызванным волнами (Craig, 1977; Leibovich, 1977, 1980). Циркуляции Ленгмюра обычно возникают при скорости ветра более 3–5 м/с, а их формирование занимает всего несколько минут (Thorpe, 2004). В поперечном сечении роликов формируются чередующиеся вихревые ячейки (их длина может достигать нескольких километров), которые вращаются в противоположных направлениях, вызывая образование линий, разделяющих сходящиеся и расходящиеся поверхностные потоки, связанные, соответственно, с нисходящим и восходящим течением под этими линиями. Вода в ячейках также движется по ветру, так что движение носит спиралевидный характер.

Несмотря на важность проблемы локализации ПМ в ветровых полосах, как наблюдения, так и контролируемые натурные эксперименты по исследованию скопления мусора в поле соответствующих течений пока немногочисленны. На данный момент авторам известна лишь одна работа, описывающая контролируемый натурный эксперимент по локализации мусора в ветровых полосах (Chang et al., 2019), и поэтому требуются дополнительные исследования в этом направлении.

Настоящая работа нацелена на дальнейшее изучение эффекта локализации ПМ в ветровых полосах по данным: а) анализа мультиспектральных изображений Каспийского моря (залив Кара-Богаз-Гол) со спутника Sentinel-2 и б) результатов специальных экспериментов, выполненных на Горьковском водохранилище, в ходе которых моделировались процессы вовлечения плавающих в приповерхностном слое воды пластиковых объектов в области конвергенции циркуляций Ленгмюра.

## Анализ данных спутниковых наблюдений

Ветровые полосы хорошо наблюдаются из-за скопления в них пены и различного мусора, по этой же причине они могут наблюдаться и на спутниковых мультиспектральных изображениях. Однако непосредственно обнаружить наличие ПМ в полосах, наблюдаемых на оптических спутниковых снимках, сложно из-за недостаточно высокого пространственного разрешения таких изображений (порядка и больше 10 м для данных в открытом доступе). В то же время в литературе предложены алгоритмы обработки и обнаружения ПМ на основе индексов, определяемых комбинацией данных с разных каналов мультиспектральных изображений, включая ближний инфракрасный (*англ.* near infrared — NIR) диапазон, которые могут показать наличие пластика на поверхности воды (Themistocleous et al., 2020). Один из таких индексов — пластиковый индекс (*англ.* Plastic Index — PI), определяется следующим образом (Themistocleous et al., 2020):

$$PI = R_{NIR} / (R_{NIR} + R_{RED}),$$

где  $R_i$  — коэффициент отражения света в соответствующем диапазоне  $i = NIR, RED$  (*рис. 1б*, см. с. 207). Наличие пластика отвечают значения PI в диапазоне 0,39–0,42.

Для оценки наличия ПМ в ветровых полосах был проведён анализ некоторых спутниковых мультиспектральных изображений ветровых полос на поверхности воды. В качестве примера представлено изображение поверхности залива Кара-Богаз-Гол, полученное с помощью Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument) за 14.10.2020, на котором наблюдаются ветровые полосы в виде светлых полос в левой части изображения (см. *рис. 1а*). Интересно отметить, что кроме многочисленных ветровых полос наблюдается и область, вид которой типичен для фронтальной зоны, в её конвергентной области естественно ожидать накопления ПМ, движущегося в ветровых полосах.

Для оценки наличия ПМ был рассчитан PI для изображения на *рис. 1а*. Распределение PI показано на *рис. 1б*, из которого видно, что ветровые полосы действительно характеризуются показателями PI, указывающими на присутствие пластика в полосах.

Разумеется, динамику процесса скопления пластика в ветровых полосах по единичным спутниковым изображениям проследить невозможно. Для этого требуются наблюдения временной эволюции ПМ, например, в ходе специальных экспериментов.

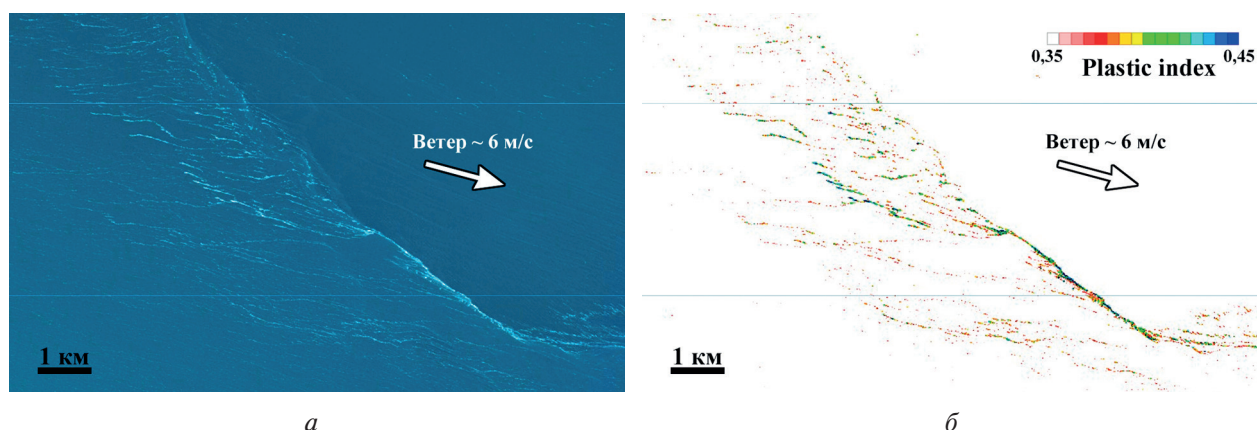


Рис. 1. Спутниковое мультиспектральное изображение ветровых полос в заливе Кара-Богаз-Гол (а), полученное 14.10.2020 инструментом MSI со спутника Sentinel-2, и пластиковый индекс для данного изображения (б). Стрелкой указано направление ветра, его скорость — 6 м/с

### Натурный эксперимент

Эксперименты по исследованию процесса скопления ПМ в областях конвергентных течений были проведены нами в летние периоды 2023–2024 гг. на Горьковском водохранилище. Эксперименты выполнялись в условиях умеренных ветров, скорость порядка 6–8 м/с, когда на поверхности воды возникали ветровые полосы, наблюдавшиеся из-за появления в них пены.

В качестве имитаторов ПМ использовались скреплённые между собой бытовые пакеты из пластика низкого давления (*англ.* low density polyethylene — LDPE). Пакеты с размерами порядка 40×50 см крепились на леске, расстояние между ними было примерно 50–70 см, общая длина такой «гирлянды» ПМ составляла около 30 м. Гирлянды из пакетов растягивались приблизительно вдоль фронтов длинных ветровых волн. Далее отслеживалась деформация гирлянды двумя способами:

- методом оконтуривания имитаторов на моторной лодке с GPS-приёмником (*англ.* Global Positioning System) на борту;
- с помощью видеокамеры, установленной на высоком берегу Горьковского водохранилища.

На рис. 2 и 3 (см. с. 208) схематически показано полученное в ходе обработки экспериментальных данных расположение имитаторов ПМ и их движение во времени. На рис. 2а представлены приблизительные контуры областей, занятых имитаторами ПМ, полученные методом оконтуривания с использованием моторной лодки. Следует отметить, что точность оконтуривания была невысокой в связи с трудностью подхода лодки к гирлянде ближе чем на 2–3 м без риска повреждения последней. Хотя контуры, представленные на рис. 2а, довольно схематичны, тем не менее их форма определённо указывает на то, что пластиковый мусор выстраивается по направлению ветра. Характерное время такого выстраивания для условий наблюдения было порядка 20 мин. На рис. 2б представлена фотография водной поверхности, на которой различима ветровая полоса с пеной, в эту же полосу по истечению указанного времени втянулась и гирлянда из пакетов. Видно, что положение гирлянды фактически совпадает с положением пенной полосы, т.е. отвечает процессу локализации ПМ в области конвергенции циркуляций Ленгмюра. На рис. 3 имитаторы вытянулись по направлению ветра за 8 мин. Следует отметить, что в экспериментах, представленных на рис. 2, скорость ветра была порядка 6 м/с, а на рис. 3 — около 8 м/с. Кроме того, на рис. 3 хорошо видна сликовая полоса, наблюдаемая ниже имитаторов, ориентированная в том же направлении, что и гирлянда из пакетов в конце наблюдений. Сливковая полоса отчётливо наблюдается из-за наличия в ней плёнки, гасящей короткие ветровые волны, которая накопилась там из-за

конвергентных течений на границе соседних ячеек циркуляций Ленгмюра. Полученное в экспериментах время локализации ПМ хорошо соответствует характерному времени, зарегистрированному в натуральных экспериментах, описанных в литературе (см. (Chang et al., 2019), где в качестве имитаторов мусора использовались бамбуковые тарелки).

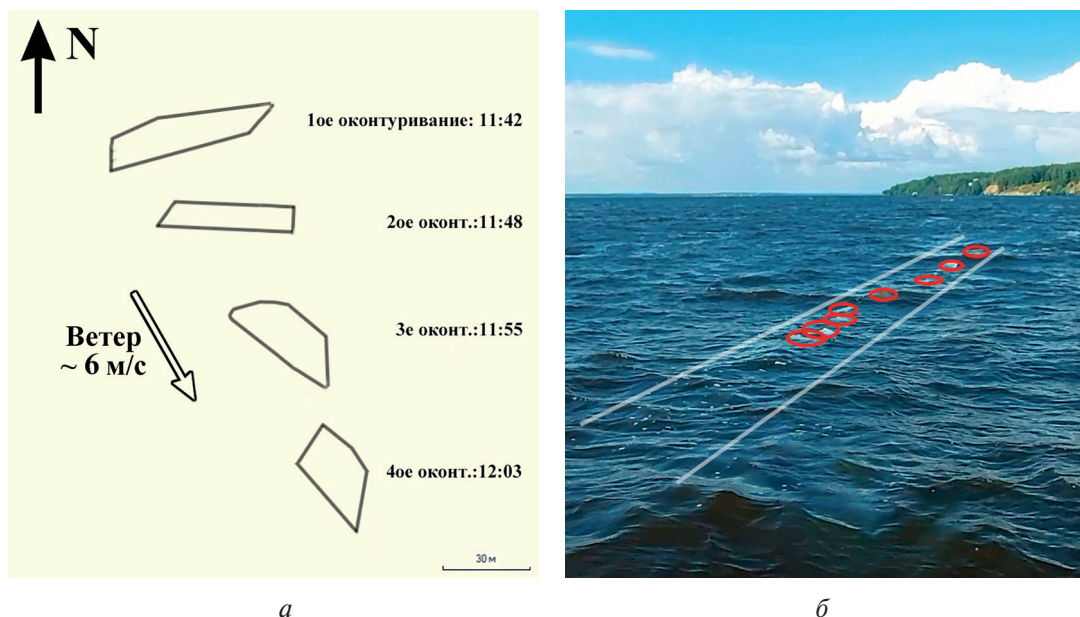


Рис. 2. Изменение контура имитаторов пластикового мусора со временем, полученное методом оконтуривания (а). Фото, сделанное во время натуральных экспериментов (15 мин от начала эксперимента) (б), светлыми линиями выделена пенная ветровая полоса, красные области — пластиковые пакеты в гирлянде. Скорость ветра — 6 м/с

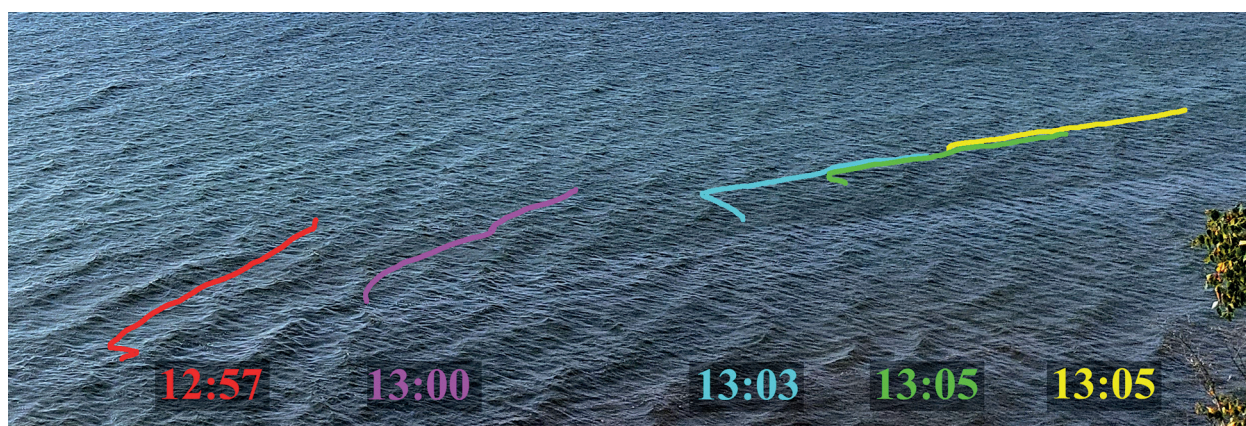


Рис. 3. Расположение имитаторов пластикового мусора в различные моменты времени от начала эксперимента, полученное с помощью видеосъёмки. Скорость ветра — 8 м/с

Применяя известные из литературы данные о скорости течений в циркуляциях Ленгмюра, легко оценить ожидаемое характерное время ориентирования гирлянд ПМ. Известно, что разность скорости течений  $\Delta v$  по направлению ветра в зонах конвергенции и дивергенции варьируется в пределах 1–17 см/с ((Монин, Красицкий, 1985) и цитируемые работы). Полагая, что  $\Delta v \sim 5\text{--}10$  см/с (отметим, что поперечная скорость также порядка единиц сантиметров в секунду) несложно оценить, что поворот гирлянды длиной  $L \sim 30$  м из положения поперёк ветра в положение вдоль ветра произойдёт за время примерно 7–15 мин. Эта оценка хорошо согласуется с нашими наблюдениями.

## Заключение

На основе анализа спутниковых мультиспектральных данных и расчётов распределения пластикового индекса PI проиллюстрирован эффект локализации пластикового мусора в ветровых полосах, связанных с циркуляцией Ленгмюра.

С использованием данных специальных экспериментов с гирляндами из пластиковых пакетов показано, что пластиковый мусор ориентируется вдоль ветра, локализуясь в ветровых полосах за время порядка 10–20 мин, которое предположительно зависит от скорости ветра. Полученные данные хорошо согласуются с данными наблюдений скорости в циркуляциях Ленгмюра, представленными в литературе, в частности в публикации (Chang et al., 2019).

Отметим, что пластиковый мусор, вообще говоря, нельзя рассматривать как пассивные маркеры и что его динамика в ветровых полосах может существенно зависеть от размеров пластиковых объектов, их плотности, заглубления в воде, нестационарности течений и т.д. Поэтому в дальнейшем предполагается выполнение более детальных экспериментов с ПМ и изучение его динамики в поле переменных течений.

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

## Литература

1. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 375 с.
2. Acha E. M., Mianzan H. W., Iribarne O. et al. The role of the Río de la Plata bottom salinity front in accumulating debris // *Marine Pollution Bull.* 2003. V. 46. No. 2. P. 197–202. DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00356-9.
3. Carlson D. F., Özgökmen T., Novelli G. et al. Surface ocean dispersion observations from the ship-tethered aerostat remote sensing system // *Frontiers in Marine Science.* 2018. V. 5. Article 479. DOI: 10.3389/fmars.2018.00479.
4. Chang H., Huntley H. S., Kirwan A. D. et al. Small-scale dispersion in the presence of Langmuir circulation // *J. Physical Oceanography.* 2019. V. 49. No. 12. P. 3069–3085. DOI: 10.1175/JPO-D-19-0107.s1.
5. Cózar A., Echevarría F., González-Gordillo J. I. et al. Plastic debris in the open ocean // *Proc. National Academy of Sciences.* 2014. V. 111. No. 28. P. 10239–10244. DOI: 10.1073/pnas.1314705111.
6. Cózar A., Aliani S., Basurko O. C. et al. Marine litter windrows: a strategic target to understand and manage the ocean plastic pollution // *Frontiers in Marine Science.* 2021. V. 8. Article 571796. DOI: 10.3389/fmars.2021.571796.
7. Craik A. D. D. The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism // *J. Fluid Mechanics.* 1977. V. 81. No. 2. P. 209–223. DOI: 10.1017/S0022112077001980.
8. Eriksen M., Lebreton L. C., Carson H. S. et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea // *PLOS One.* 2014. V. 9. No. 12. Article e111913. DOI: 10.1371/journal.pone.0111913.
9. Law K. L., Morét-Ferguson S., Maximenko N. A. et al. Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre // *Science.* 2010. V. 329. No. 5996. P. 1185–1188. DOI: 10.1126/science.1192321.
10. Law K. L., Morét-Ferguson S. E., Goodwin D. S. et al. Distribution of surface plastic debris in the eastern Pacific Ocean from an 11-year data set // *Environmental Science and Technology.* 2014. V. 48. No. 9. P. 4732–4738. DOI: 10.1021/es4053076.
11. Leibovich S. Convective instability of stably stratified water in the ocean // *J. Fluid Mechanics.* 1977. V. 82. No. 3. P. 561–581. DOI: 10.1017/S0022112077000846.
12. Leibovich S. On wave-current interaction theories of Langmuir circulations // *Annu. Review of Fluid Mechanics.* 1980. V. 15. P. 391–427. DOI: 10.1017/S0022112080000857.
13. Suaria G., Berta M., Griffa A. et al. Dynamics of transport, accumulation, and export of plastics at oceanic fronts // *Chemical Oceanography of Frontal Zones.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. P. 355–405. DOI: 10.1007/978-3-662-60814-4\_814.
14. 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.
15. Thorpe S. A. Langmuir circulation // *Annu. Review of Fluid Mechanics.* 2004. V. 36. No. 1. P. 55–79. DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431.

16. Van Roekel L. P., Fox-Kemper B., Sullivan P. P. et al. The form and orientation of Langmuir cells for misaligned winds and waves // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2012. V. 117. No. C5. Article C05001. 22 p. DOI: 10.1029/2011JC007516.
17. van Sebille E., Wilcox C., Lebreton L. et al. A global inventory of small floating plastic debris // *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. No. 12. Article 124006. 11 p. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/124006.

## Observations of plastic debris localization in windrows on the water surface

O. A. Danilicheva<sup>1</sup>, S. A. Ermakov<sup>1,2</sup>, G. V. Leshchev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*  
E-mails: [olgadan@ipfran.ru](mailto:olgadan@ipfran.ru), [stas.ermakov@ipfran.ru](mailto:stas.ermakov@ipfran.ru), [georgeleshev@ipfran.ru](mailto:georgeleshev@ipfran.ru)

<sup>2</sup> *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

This paper aims to investigate the effect of plastic debris localization in windrows using the analysis data of multispectral images of the Caspian Sea from the Sentinel-2 satellite and the results of special *in situ* experiments at the Gorky Reservoir. The processes of entrainment of debris floating in the near-surface water layer into the area of Langmuir circulation convergence are modeled during special experiments. On the basis of satellite multispectral data analysis and calculation of plastic index (PI) distribution, the effect of plastic debris localization in the windrows associated with Langmuir circulation is illustrated. Using data from special experiments with plastic debris simulators, it is shown that plastic debris is oriented along wind, localizing in the windrows in times of the order of 10–20 minutes, these times are assumed to depend on wind speed. The obtained data are in good agreement with observations of velocities in Langmuir circulations reported in literature.

**Keywords:** plastic debris, Langmuir circulations, windrows, water surface

Accepted: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-205-211

## References

1. Monin A. S., Krasitsky V. P., *Yavleniya na poverkhnosti okeana* (Phenomena on the surface of the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 375 p. (in Russian).
2. Acha E. M., Mianzan H. W., Iribarne O. et al., The role of the Río de la Plata bottom salinity front in accumulating debris, *Marine Pollution Bull.*, 2003, V. 46, No. 2, pp. 197–202, DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00356-9.
3. Carlson D. F., Özgökmen T., Novelli G. et al., Surface ocean dispersion observations from the ship-tethered aerostat remote sensing system, *Frontiers in Marine Science*, 2018, V. 5, Article 479, DOI: 10.3389/fmars.2018.00479.
4. Chang H., Huntley H. S., Kirwan A. D. et al., Small-scale dispersion in the presence of Langmuir circulation, *J. Physical Oceanography*, 2019, V. 49, No. 12, pp. 3069–3085, DOI: 10.1175/JPO-D-19-0107.s1.
5. Cózar A., Echevarría F., González-Gordillo J. I. et al., Plastic debris in the open ocean, *Proc. National Academy of Sciences*, 2014, V. 111, No. 28, pp. 10239–10244, DOI: 10.1073/pnas.1314705111.
6. Cózar A., Aliani S., Basurko O. C. et al., Marine litter windrows: a strategic target to understand and manage the ocean plastic pollution, *Frontiers in Marine Science*, 2021, V. 8, Article 571796, DOI: 10.3389/fmars.2021.571796.
7. Craik A. D. D., The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism, *J. Fluid Mechanics*, 1977, V. 81, No. 2, pp. 209–223, DOI: 10.1017/S0022112077001980.
8. Erikson M., Lebreton L. C., Carson H. S. et al., Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea, *PLOS One*, 2014, V. 9, No. 12, Article e111913, DOI: 10.1371/journal.pone.0111913.

9. Law K. L., Morét-Ferguson S., Maximenko N. A. et al., Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre, *Science*, 2010, V. 329, No. 5996, pp. 1185–1188, DOI: 10.1126/science.1192321.
10. Law K. L., Morét-Ferguson S. E., Goodwin D. S. et al., Distribution of surface plastic debris in the eastern Pacific Ocean from an 11-year data set, *Environmental Science and Technology*, 2014, V. 48, No. 9, pp. 4732–4738, DOI: 10.1021/es4053076.
11. Leibovich S., Convective instability of stably stratified water in the ocean, *J. Fluid Mechanics*, 1977, V. 82, No. 3, pp. 561–581, DOI: 10.1017/S0022112077000846.
12. Leibovich S., On wave-current interaction theories of Langmuir circulations, *Annu. Review of Fluid Mechanics*, 1980, V. 15, pp. 391–427, DOI: 10.1017/S0022112080000857.
13. Suaria G., Berta M., Griffo A. et al., Dynamics of transport, accumulation, and export of plastics at oceanic fronts, In: *Chemical Oceanography of Frontal Zones*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, pp. 355–405, DOI: 10.1007/698\_2021\_814.
14. Themistocleous K., Papoutsis 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.
15. Thorpe S. A., Langmuir circulation, *Annu. Review of Fluid Mechanics*, 2004, V. 36, No. 1, pp. 55–79, DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431.
16. Van Roekel L. P., Fox-Kemper B., Sullivan P. P. et al., The form and orientation of Langmuir cells for misaligned winds and waves, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2012, V. 117, No. C5, Article C05001, 22 p., DOI: 10.1029/2011JC007516.
17. van Sebille E., Wilcox C., Lebreton L. et al., A global inventory of small floating plastic debris, *Environmental Research Letters*, 2015, V. 10, No. 12, Article 124006, 11 p., DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/124006.