

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ, ПОСТУПАЮЩИХ В СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН С РЕЧНЫМИ ВОДАМИ

Градова М.А.

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск
gradova.ma.22@gmail.com*

Загрязнение Мирового океана пластиковым мусором является одной из наиболее актуальных экологических проблем нашего времени. Пластмасса сохраняется в окружающей среде в течение длительного периода времени и распространяется по всему миру [1], распадаясь на микропластик и нанопластик (размер ≤ 5 мм и ≤ 1 мкм [2], соответственно) из-за воздействия солнечного света и волн, механического истирания, взаимодействия с биотой [3]. Пластиковое загрязнение представляет собой потенциальную угрозу для морских организмов и морской среды в целом [4].

Оценка переноса загрязнения в арктических водах является отдельной непростой задачей ввиду труднодоступности региона и отсутствия постоянной сети наблюдений. Хотя загрязнение Северного Ледовитого океана происходит из местных источников (рыбных промыслов, свалок, сточных вод и морской промышленной деятельности), существенным источником пластика являются удаленные регионы более низких широт, из которых загрязнение переносится в Арктику океаническими течениями, атмосферными потоками и реками. Например, большая часть натуральных данных и данных моделирования показывают, что значительная часть пластика поступает в Арктику из Северной Атлантики [5, 6] и северной части Тихого океана [7, 8]. В результате анализа проб воды в Евразийском бассейне речные стоки были определены как второй по величине источник загрязнения микропластиком в этом регионе [9]. Сибирские реки имеют огромные площади водосбора, пересекают крупные города, промышленные и сельскохозяйственные районы и принимают сточные воды неизвестной степени очистки. Количество мусора в сибирских шельфовых морях указывает на низкий вклад рек осенью [10], однако массовый сброс речных вод поздней весной или летом делает воздействие потенциально существенным.

В настоящий момент для оценки загрязнения микропластиком и связанных с ним рисков интенсивно развиваются методы моделирования

[11]. В докладе представлено предварительное исследование того, как плавучие пластиковые компоненты распространяются по акватории Северного Ледовитого океана. Исследование проводится на основе трехмерной численной модели океана и морского льда SibCIOM, разработанной в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [12, 13]. Учет атмосферного воздействия обусловлен использованием данных реанализа атмосферы NCEP/NCAR [14] для формирования потоков на границах раздела сред океан-атмосфера и лед-атмосфера. Область моделирования включает в себя Северный Ледовитый океан и Атлантический океан, ограниченный 20° ю. ш. Для проведения численного моделирования используется численная трехполярная сетка, включающая 0.5 -градусное разрешение к югу от 65° с. ш. и обеспечивающая в среднем шаг в 18 км в полярном регионе.

Численная модель дополнена блоком распространения лагранжевых трассеров. Трассеры переносятся системой рассчитанных течений на каждом шаге численной модели и включаются в процессы перемешивания. Каждый трассер в каждый момент записи несет информацию о его координатах, температуре и солености воды в данной точке, времени и месте выпуска. В качестве трассеров по-отдельности рассматриваются семь наиболее распространенных в производстве типов пластика: полиэтилен высокой плотности (HDPE), полиэтилен низкой плотности (LDPE), поливинилхлорид (PVC), полистирол (PS), полипропилен (PP), полиэтилентерефталат (PET) и полиуретан (PUR) – со скоростью подъема или опускания в зависимости от плотности пластика, определенной в соответствии с [15]. Четыре из этих семи видов пластика (PVC, PS, PET и PUR) имеют отрицательную плавучесть с соответствующей скоростью опускания. Частицы микропластика поступают в шельфовую область в районе устьев наиболее крупных сибирских рек (Обь, Енисей, Лена) пропорционально расходу реки в течение некоторого периода. При реализации лагранжева переноса трассеров скорость подъема или опускания добавляется к вертикальной компоненте скорости течения в точке нахождения пластиковой частицы.

Конечное положение трассеров, выпущенных в течение 2016-2020 гг., показывает, что большая часть тяжелых частиц, имеющих отрицательную плавучесть, оседает на мелководном шельфе в непосредственной близости от речного устья. Микропластик с положительной плавучестью распространяется преимущественно поверхностными течениями океана, в том числе активно выходя за пределы сибирских шельфовых морей (рис. 1). Загрязнения, приносимые Леной, по большей части распространяются в акватории шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и при выходе на материковый склон включаются в антициклонический Круговорот Канадского бассейна. Значительно реже они появляются в

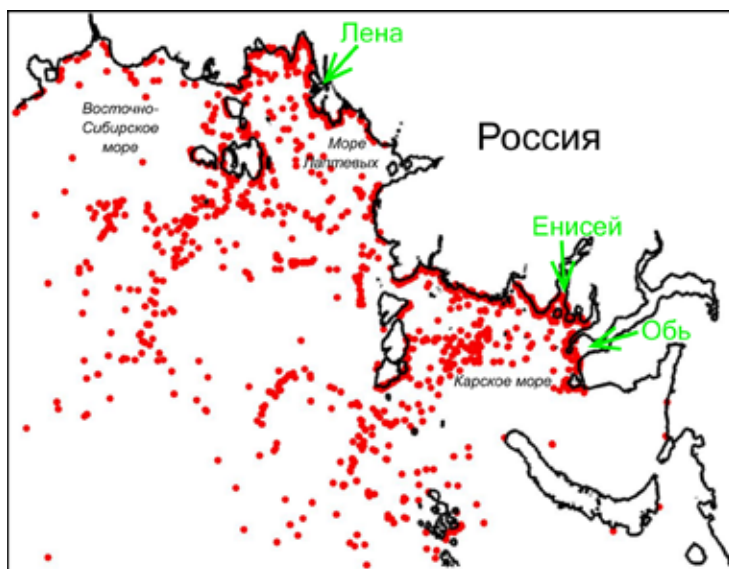


Рис. 1. Конечное положение модельных частиц микропластика, выпущенных с речными водами на шельф Карского моря и моря Лаптевых в период с 2016 по 2020 гг.

западной части глубоководного бассейна Арктики. Трассеры Оби-Енисея заполняют Евразийский бассейн и интенсивно выносятся через пролив Фрама. Для существенной части микропластика, поступающего со стороны всех трех рек, характерно прибывание частиц к берегу материка и островов, расположенных к востоку от устья соответствующей реки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 20-11-20112.

Литература

1. Bergmann M., Tekman M., Gutow L. Sea change for plastic pollution // *Nature*. 2017. V. 544. P. 297. <https://doi.org/10.1038/544297a>.
2. Gigault J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? // *Environ. Pollut.* 2018. V. 235. P. 1030–1034. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>.
3. Andrady A.L. Persistence of Plastic Litter in the Oceans // Springer, Cham. In: Bergmann M., Gutow L., Klages M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_3.
4. Thushari G.G.N., Senevirathna J.D.M. Plastic pollution in the marine environment // *Heliyon*. 2020. V. 27. № 6(8):e04709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709>.
5. van Sebille E., Wilcox C., Lebreton L., Maximenko N., Hardesty B. D., van Franeker J. A., Eriksen M., Siegel D., Galgani F., Law K. L. A global inventory of small floating

- plastic debris // *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. № 12 [124006]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>.
6. Cózar A. et al. Plastic debris in the open ocean // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2014. V. 111. P. 10239–10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111>.
 7. Mu J. et al. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2019. V. 143. P. 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.023>.
 8. Kim S.-K. et al. Importance of seasonal sea ice in the western Arctic ocean to the Arctic and global microplastic budgets // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 418. № 125971. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125971>.
 9. Yakushev E. et al. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Commun. Earth Environ.* 2021. V. 2. № 23. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00091-0>.
 10. Pogojeva M. et al. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas // *Mar. Pollut. Bull.* 2021. V. 166. № 112201. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112201>.
 11. Sheela A.M., Manimekalai B., Dhinakaran G. Review on the distribution of microplastics in the oceans and its impacts: Need for modeling-based approach to investigate the transport and risk of microplastic pollution // *Environmental Engineering Research*. 2022. V. 27 № 4: 210243. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.243>.
 12. Golubeva E.N., Platov G.A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № C04S05. <https://doi.org/10.1029/2006JC003734>
 13. Голубева Е.Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии*. 2008. № 13(5). С. 11-24.
 14. Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437-470. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 18.07.2023).
 15. Mountford A.S., Morales Maqueda M.A. Eulerian Modeling of the Three-Dimensional Distribution of Seven Popular Microplastic Types in the Global Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. P. 8558– 8573. <https://doi.org/10.1029/2019JC015050>.