РЕЦЕНЗИЯ № 2

на статью **«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МИКРОПЛАСТИКА В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ»**
авторского коллектива: М. А. Градова, Е. Н. Голубева

Представленная работа демонстрирует комплексный подход для описания переноса микропластика (МП) в водах Северного Ледовитого океана (СЛО) с учетом формы частиц – волокон (т. е. тонкие цилиндры). Работа является логичным продолжением предыдущих публикаций авторов. Они используют хорошо апробированную ранее совместную модель океана и морского льда SibCIOM, которая позволяет реконструировать общую циркуляцию вод арктического бассейна.

На основе этой информации и лагранжевой модели переноса рассчитываются траектории МП частиц. Этот подход довольно часто используется в работах по данной тематике. При этом учитываются некоторые важные процессы взаимодействия МП с окружающей средой: параметризация вмерзания/высвобождения частиц из морского льда, расчёт собственной вертикальной скорости осаждения/всплытия для формы тонких цилиндров, модель биообрастания Коои, адаптированной к арктических условиям, дополнительную параметризацию осаждения с морскими агрегатами (5 % массы в год). Результаты демонстрируются на основе распределения итогового положения частиц двух размеров (0,5 мм × 1 мкм и 5 мм × 50 мкм), выпущенных в акваторию СЛО из Тихого и Атлантического океанов, в период 2016–2020 гг.

Актуальность выбранной темы исследований не вызывает сомнений – в современных условиях Арктика является зоной аккумуляции МП. При этом форма волокон доминирует в отобранных пробах. Работа действительно важна с точки зрения понимания роли размера частиц, их формы, процессов биообрастания и ледового дрейфа.

Используемые в работе методы численного моделирования в целом выглядят обоснованными и достаточно полным для решения поставленной задачи – использование апробированной численной модели и реконструированных с ее помощью квазиреалистичных полей течений, льда, температуры, солёности и проникающей радиации, полученных на основе реанализа NCEP/NCAR, можно отнести к сильным сторонам работы. Отметим важность учёта формы частиц МП, поскольку волокна составляют >90 % МП в поверхностных слоях СЛО. Авторы попытались параметризовать взаимодействие с морским льдом (вероятность вмерзания 10 %, высвобождение пропорционально уменьшению объёма льда) и биообрастание во льду на основе сезонных графиков Кастеллани. Продемонстрированы индивидуальные траектории частиц, которые показали, как размер частицы в зависимости от скорости всплытия/погружения и процесса биообрастания определяет «режим» её движения (поверхностный/ледовый vs. подповерхностный). Связь вертикального положения частицы с трёхмерной циркуляцией и дрейфом льда хорошо объясняет различия в пространственном распределении мелких и крупных частиц. Кроме того, воспроизведены циклы погружения – всплытия, связанные с ростом/деградацией биопленки.

Вместе с тем, можно отметить ряд замечаний работы по существу:

1. Более точное описание расчетного домена модели. В текущей версии описания авторы отмечают «…Северный Ледовитый океан и Атлантический океан, ограниченные 20° ю. ш.» Однако, поступление частиц задается и через Беренгов пролив. Следовательно, акватория Тихого океана тоже учитывается при численном моделировании циркуляции? Здесь же (редакционное): географически акватория СЛО не может быть ограничена 20° ю. ш. Вероятно, авторы имели в виду «.. СЛО и акватории Атлантического и Тихого океанов, ограниченные 20° ю. ш.».

2. Указана плотность полипропилена – 1010 кг/м³. Классический полипропилен обычно имеет меньшую плотность – ~900–910 кг/м³. Необходимо пояснить, почему выбран именно этот вариант, и, возможно, привести рассуждения о том, как это влияет на исходную плавучесть.

3. Необходимо обосновать выбранную формулу скорости оседания с учетом результатов работы (Dittmar S. et al., 2024) https://pubs.acs.org/action/showCitFormats?doi=10.1021/acs.est.3c09602&ref=pdf, где показано, что ряд моделей (в том числе Хатмуллиной и Исаченко) дают плохие точности оценки для «маленьких» частиц.

4. По возможности добавить небольшое описание взаимодействия частиц МП с берегом.

5. В численных экспериментах используется величина поступления МП ~95 частиц/год, что, по-видимому, мало для статистической обеспеченности распределений. Желательно, по возможности, показать, что основные выводы об итоговых распределениях устойчивы при любом числе частиц.

К редакционным, кроме замечания из п. 1 выше, можно отнести также:

1. *Строки 131–132:* термин «усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса» лучше расширить до «системы примитивных уравнений».
2. *Наличие неправильных гиперссылок*: Например, *строка 141,* ссылка (Gradova, Golubeva, 2023) ведет не на ту статью.
3. *Строка 148:* «Расчет траекторий частиц МП моделируется..» лучше заменить на «Траектории частиц МП рассчитываются…».
4. *Строки 283–284:* неправильная пунктуация. Правильно: «Как было отмечено в работах (…)**,** это обусловлено не только поступлением загрязнения …».
5. *Строки 290–292:* неправильная пунктуация. Правильно: «Для атлантических частиц малого размера нет значительных различий между летним и зимним распределением (рисунки 1а, в), так же как и для тихоокеанских частиц».
6. *Строка 359:* неправильная пунктуация: убрать запятую после Т2.
7. *Строка 402:* «… опустившись **на** глубину…».

Выше перечисленные замечания не влияют на содержание работы. Таким образом, считаю, что статья «Численное моделирование переноса микропластика в Арктических водах» может быть принята после доработки.

Подпись. Рецензент № 2. 28.07.2026.

От редакции: рецензия была направлена авторскому коллективу.

<u>Ответ рецензенту № 2</u> на рецензию от 28.07.2026 на статью авторского коллектива: М. А. Градова, Е. Н. Голубева «ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МИКРОПЛАСТИКА В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ»

Авторы искренне признательны Рецензенту за содержательный анализ нашей работы и внимание к деталям. Конструктивные замечания указали на аспекты, требовавшие существенной доработки и пересчета численных экспериментов.

Ниже приведены ответы на каждое замечание с указанием конкретных изменений, внесенных в текст статьи. Для удобства сопоставления все новые и измененные фрагменты в рукописи выделены цветами. Этой рецензии соответствует желтый цвет.

Рецензент: *Более точное описание расчетного домена модели. В текущей версии описания авторы отмечают «…Северный Ледовитый океан и Атлантический океан, ограниченные 20° ю. ш.» Однако, поступление частиц задается и через Берингов пролив. Следовательно, акватория Тихого океана тоже учитывается при численном моделировании циркуляции? Здесь же (редакционное): Географически акватория СЛО не может быть ограничена 20° ю. ш. Вероятно, авторы имели в виду «.. СЛО и акватории Атлантического и Тихого океанов, ограниченные 20° ю. ш.».*

Ответ: Мы согласны, что прежняя формулировка имела неточность. Чтобы исключить двусмысленное трактование, мы изменили описание расчетной области (строки 130–132).

Рецензент: *Указана плотность полипропилена – 1010 кг/м³. Классический полипропилен обычно имеет меньшую плотность – ~900–910 кг/м³. Необходимо пояснить, почему выбран именно этот вариант, и, возможно, привести рассуждения о том, как это влияет на исходную плавучесть.*

Ответ: Мы полностью согласны с Рецензентом, что допустили ошибку в выборе значения плотности полипропилена. Значение 1010 кг/м3 было взято из статьи (Mountford, Morales Maqueda, 2019, https://doi.org/10.1029/2019JC015050), где оно подавалось, как средняя плотность этого материала. Действительно, во всех других источниках значение плотности гораздо ниже. В силу того, что полипропилен составляет существенную, а по некоторым данным основную, часть микропластикового загрязнения в Арктике и является самым распространенным полимером, использующимся в Европе, мы хотели провести это исследование именно для этого типа пластика. Поэтому мы пересчитали численные эксперименты со значением 910 кг/м3 (строка 248).

Рецензент: *Необходимо обосновать выбранную формулу скорости оседания с учетом результатов работы (Dittmar S. et al., 2024) https://pubs.acs.org/action/showCitFormats?doi=10.1021/acs.est.3c09602&ref=pdf, где показано, что ряд моделей (в том числе Хатмуллиной и Исаченко) дают плохие точности оценки для «маленьких» частиц.*

Ответ: Благодарим за указание на источник (Dittmar et al., 2024). В соответствии с рекомендациями этой работы, формула скорости оседания была заменена на другую, показавшую лучшую применимость в диапазоне наших размеров частиц. Все результаты в новой версии рукописи представлены для нового расчета с учетом замечаний 2 и 3 (новая плотность частиц и новая скорость оседания). При этом общие черты распространения частиц по акватории Северного Ледовитого океана сохранились, и текст потребовал лишь нескольких изменений касательно процентного распределения частиц по разным глубинам (строки 268-270, 295, 317). Сравнение возможных отличий в траекториях крупных и мелких частиц претерпели большие изменения при расчете с новой конфигурацией модели. Это отражено на рисунке 4 и в строках 350–385.

Рецензент: *По возможности добавить небольшое описание взаимодействии частиц МП с берегом.*

Ответ: Взаимодействие частиц с берегом в данной работе не учитывалось, уточнение было добавлено в текст (строки 244–245).

Рецензент: *В численных экспериментах используется величина поступления МП ~95 частиц/год, что, по-видимому, мало для статистической обеспеченности распределений. Желательно, по возможности, показать, что основные выводы об итоговых распределениях устойчивы при любом числе частиц.*

Ответ: Благодарим Рецензента за ценное указание. Вопрос статистической обеспеченности крайне важен для численного моделирования. Стоит отметить, что в описании была ошибка. Прежде в расчетную область поступало не суммарно 95 частиц/год, а с каждого из двух проливов. В соответствии с рекомендацией, мы провели дополнительные тесты и увеличили объем поступления микропластика в несколько раз. Проведенные тесты подтвердили устойчивость наших первоначальных результатов, так как основные черты распространения микропластика не продемонстрировали сколько-нибудь значимых отличий от базового варианта. Однако, при визуализации плотность частиц на карте становится больше, что мешает восприятию распределения частиц по глубинам. В новой версии рукописи мы приводим результаты при суммарном поступлении ~300 частиц/год (строка 247), точное число варьируется от года к году, так как поступление частиц зависит от расхода воды через проливы.

Рецензент: *Редакционные замечания:*

1. Строки 131–132: термин «усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса» лучше расширить до «системы примитивных уравнений».

2. Наличие неправильных гиперссылок. Например, строка 141: ссылка (Gradova, Golubeva, 2023) ведет не на ту статью.

3. Строка 148: «Расчет траекторий частиц МП моделируется..» лучше заменить на «Траектории частиц МП рассчитываются…».

4. Строки 283–284: неправильная пунктуация. Правильно: «Как было отмечено в работах (…), это обусловлено не только поступлением загрязнения …».

5. Строки 290–292: неправильная пунктуация. Правильно: «Для атлантических частиц малого размера нет значительных различий между летним и зимним распределением (рисунки 1а, в), так же как и для тихоокеанских частиц».

6. Строка 359: неправильная пунктуация: убрать запятую после T2.

7. Строка 402: «… опустившись на глубину…».

Ответ: Текст статьи был повторно отредактирован (1 – стр. 124–126; 2 – стр. 224–225, 662, 859; 3 – стр. 142; 4 – стр. 299; 5 – стр. 308; 6 – такое предложение убрано; 7 – стр. 418).

Общие изменения, не относящие к замечаниям ни одной из рецензий, выделены серым цветом. К ним также относится изменение порядка рисунков: циркуляция океана и дрейф льда, ранее стоявшие под Рис. 2, теперь приведены как Рис. 1.

С уважением, авторский коллектив. 20.08.2026.

От редакции: ответ и доработанная версия статьи были направлены редакцией рецензенту.

Подтверждение Рецензента № 2 на публикацию:

Уважаемая редакция.

Текущий вариант статьи может быть опубликован без каких-либо доработок.

Подпись. Рецензент № 2. 25.08.2026.