© Градова М. А., Голубева Е. Н., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 3, С. 147–172

УДК 551.463.8 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).8

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МИКРОПЛАСТИКА В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ

**М. А. Градова, Е. Н. Голубева**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,*
*Россия, 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6,*
*e-mail: gradova.ma.22@gmail.com*

Для анализа переноса микропластика в акватории Северного Ледовитого океана и определения мест возможной концентрации частиц в настоящей работе используется трехмерное численное моделирование, являющееся эффективным инструментом научного исследования проблемы загрязнения водной среды в дополнение к экологическому мониторингу. Численная модель позволяет рассчитывать лагранжевы траектории переноса частиц в зависимости от сезонно меняющегося состояния окружающей среды, а именно: направления и скорости течений и дрейфа льда, термохалинного состояния океана, интенсивности процессов накопления и деградации биопленки на поверхности микропластика. В данном исследовании анализируются особенности распространения в арктических водах плавучего микропластика, поступающего из Тихого и Атлантического океанов. Показано, что в полярных акваториях наличие движущегося ледяного покрова существенно влияет на траекторию движения пластиковых частиц, а процессы биообрастания в большей степени определяют глубину погружения плавучих частиц. Результаты постановочных численных экспериментов также продемонстрировали, что антициклонический круговорот Канадского бассейна, материковый склон Чукотского моря и Баренцево море являются потенциальными областями накопления микропластика в Северном Ледовитом океане в соответствии с системой циркуляции вод и дрейфа льда

**Ключевые слова:** микропластик, загрязнение океана, Северный Ледовитый океан, численное моделирование, лагранжев перенос, биообрастание микропластика

## Введение

Загрязнение окружающей среды отходами из полимерных материалов за последние десятилетия приобрело масштабы глобальной экологической катастрофы. Особую опасность представляет микропластик (МП) – частицы размером менее 5 мм, среди которых выделяют первичные (производимые для использования в промышленной и потребительской химии) и вторичные (возникающие в результате деградации и фрагментации крупногабаритного пластикового мусора) (Barnes et al., 2009; Andrady, 2011; Cole et al., 2011). Данные мониторинговых исследований свидетельствуют о глобальном характере распространения МП: он обнаружен практически во всех типах природных сред, включая акватории Мирового океана от экватора до самых удаленных полярных регионов (Obbard et al., 2014; Halsband, Herzke, 2019; Peeken et al., 2018; Чубаренко и др., 2021). Особого внимания заслуживает состояние

хрупкой и уязвимой экосистемы Северного Ледовитого океана (СЛО), который, несмотря на удаленность от крупных промышленных центров, играет роль глобального стока антропогенного мусора (Cózar et al., 2017).

Ежегодное поступление пластиковых отходов в Мировой океан оценивается в среднем в 8 млн тонн (Jambeck et al., 2015), что формирует устойчивую угрозу для морской биоты, в основном заключающуюся в двух факторах. Во-первых, из-за внешнего сходства мелких частиц с объектами питания, они ошибочно проглатываются морскими организмами, что вызывает механические повреждения пищеварительного тракта, снижение темпов роста и метаболические нарушения, зачастую ведущие к летальному исходу (Wright et al., 2013). Во-вторых, благодаря адсорбционным свойствам, МП аккумулирует на своей поверхности стойкие органические загрязнители и металлы из окружающей воды (Mato et al., 2001; Teuten et al., 2009), что впоследствии может способствовать переносу токсинов вверх по пищевой цепи (Carbery et al., 2018).

Методы математического моделирования, позволяющие построить траектории распространения пластиковых частиц и определить потенциальные области их концентрации, могут стать полезным инструментом в дополнение к анализу результатов натурных наблюдений. Развитие методологии моделирования переноса МП в СЛО прошло путь от упрощенных лагранжевых схем до многокомпонентных систем.

На ранних этапах исследования опирались преимущественно на глобальные модели океанической циркуляции, где частицы МП рассматривались как идеализированные пассивные трассеры с нейтральной плавучестью (Lebreton et al., 2012; van Sebille et al., 2012; Eriksen, et al., 2014; Cózar et al., 2017). Однако эти модели не учитывали вертикальный перенос и взаимодействие со льдом и биотой, а потому не могли объяснить обнаружение высоких концентраций пластика в донных отложениях и ледяном покрове. Дальнейшее развитие моделей переноса в северных широтах включало в себя учет отдельных аспектов вертикального перемещения частиц (Bagaev et al., 2017; Mountford, Morales Maqueda, 2019; Osinski et al., 2020; Schernewski et al., 2020; Herzke et al., 2021; Huserbråten et al., 2022; Rey et al., 2026), а также включение МП в лед (Mountford, Morales Maqueda, 2021), но в этих работах также не учитывалось биообрастание (т. е. процесс накопления живых организмов на поверхности), которое выделяется в качестве основного механизма, ответственного за осаждение МП в водной среде (Fazey, Ryan, 2016; Kaiser et al., 2017; Chen et al., 2019).

Биообрастание, достаточное для погружения плавучего МП, было теоретически описано в работе Ирины Петровны Чубаренко с соавторами (Chubarenko et al., 2016), где были получены некоторые приблизительные оценки основных пространственных и временных масштабов, характеризующие поведение частиц различной плотности и формы в Балтийском море. В исследованиях, где предпринимались попытки включения упрощенной параметризации биообрастания в СЛО или регионы Северной Атлантики (Балтийское море) (Murawski et al., 2022; Martyanov et al., 2023; Golubeva, Gradova, 2024b), использовались различные методологии для характеристики роста биомассы на частице и оседания МП в донные отложения, однако везде отсутствовала возможность деградации биопленки, которая приводила бы к очистке частиц и восстановлению плавучести.

В работе Березиной и соавторов (Berezina et al., 2021) представлена математическая модель, описывающая переход МП между четырьмя состояниями: свободно плавающий, с биопленкой, поглощенный зоопланктоном и находящийся в детрите. Несмотря на допущения о постоянной скорости погружения для каждой из категорий, эта модель успешно воспроизвела ключевые аспекты взаимодействия МП с биотой в Осло-фьорде.

Более детальная параметризация биообрастания, предложенная в работе (Kooi et al., 2017), учитывает динамику накопления биопленки на поверхности МП, включающую прилипание новых клеток водорослей из окружающей воды и дальнейшее размножение прикрепленных клеток, а также деградацию биопленки в результате дыхания и отмирания клеток. Одномерные тесты на основе этой модели и последующее трехмерное моделирование (Lobelle et al., 2021) показали, что фактор биообрастания приводит к концентрации МП на средних глубинах. Дальнейшее развитие этой модели (Fischer et al., 2022) включило учет выпаса и потери биопленки от вирусов вместо постоянной скорости смертности. Как оригинальная модель, так и ее усовершенствованные версии, тестировались в умеренных широтах; их непосредственная применимость к условиям СЛО остается неопределенной из-за дефицита региональных эмпирических данных.

Для исследования поведения МП в водной среде и определения мест его наибольшей концентрации в Мировом океане, в ИВМиМГ СО РАН разработана численная модель переноса–осаждения частиц МП (Golubeva, Gradova, 2024a). Модель состоит из двух основных блоков: трехмерной численной модели океана и морского льда, рассчитывающей термохалинные характеристики СЛО, поля течений и дрейфа льда, и модели биообрастания пластиковых частиц, построенной на основе одномерной модели Коои (Kooi et al., 2017). При этом модель биообрастания была адаптирована для использования в полярном регионе в условиях колонизации пластика диатомовыми арктическими водорослями.

Целью данного исследования является численное моделирование возможных траекторий распространения в СЛО пластикового загрязнения из Тихого и Атлантического океанов и анализ особенностей погружения–всплытия частиц МП разного размера.

## Методы исследования

### *Модель переноса – осаждения частиц в океане*

Для расчета траекторий переноса частиц МП в морях полярных широт необходима информация о скорости и направлении течений и дрейфа льда, а также о состоянии морской среды, в которой находится частица. В настоящем исследовании в качестве такой информации используются результаты расчета по трехмерной совместной модели океана и морского льда SibCIOM (Golubeva, Platov, 2007; Golubeva, Platov, 2009).

Модель SibCIOM состоит из океанической модели, основанной на решении системы примитивных уравнений гидротермодинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, и модели термодинамики и переноса льда CICE версии 3 (Hunke, Dukowicz, 1997; Bitz, Lipscomb, 1999; Lipscomb, Hunke, 2004). В качестве входных данных для SibCIOM используются данные атмосферного реанализа NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) (скорость ветра, температура воздуха на поверхности, осадки, длинноволновое и коротковолновое излучение). Область моделирования включает Северный Ледовитый океан и часть акватории Атлантического океана, ограниченные Беринговым проливом с одной стороны и 20° ю. ш. с другой. Модель SibCIOM ранее неоднократно использовалась для численного моделирования пространственно-временной изменчивости состояния Северного Ледовитого океана (Golubeva, Platov, 2009; Aksenov et al., 2016; Proshutinsky et al., 2019; Golubeva et al., 2021; Gradova, Golubeva, 2023). Ежедневные трехмерные поля состояния океана (скорость течения, температура, соленость, плотность) и двумерные поля состояния льда (скорость дрейфа, объем, концентрация, скорости замерзания и таяния), рассчитанные SibCIOM, используются для моделирования переноса частиц и динамики биообрастания. Интенсивность света на поверхности океана, которая требуется для построения вертикального профиля проникающей радиации в модели биообрастания, получена из данных реанализа NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996).

Траектории частиц рассчитываются с помощью модели лагранжева переноса частиц. Базовое перемещение пассивного трассера в модели определяется как: $dr = Udt$, где $dr(dx, dy, dz, t)$ – перемещение, $U = (u, v, w_p)$ – скорость частицы, если трассер находится в воде, и $U = (u_i, v_i, 0)$ – если рассматривается движение частицы, вмороженной в лед. Находясь во льду, частица не может перемещаться по вертикали. Предполагается, что суточная вероятность вмерзания микропластиковой частицы в лед оценивается в 10 % при выполнении следующих условий: 1) частица находится в верхнем 1-метровом слое океана; 2) в расчетной ячейке, к которой относится частица в данный момент времени, образуется лед в течение текущих суток; 3) концентрация ледяного покрова в расчетной ячейке превышает 15 %. Вероятность высвобождения вмерзшего МП во время таяния льда оценивается следующим образом: $P = \Delta V_i/V_i$, где $V_i(x, y, t)$ – объем льда в расчетной ячейке, а $\Delta V_i(x, y, t)$ – локальное изменение объема льда в результате таяния за время $t$. Значения компонент скорости океана и льда, а также данные о скорости таяния и замерзания льда, получены из крупномасштабной модели океана.

Скорость перемещения частицы по вертикали рассчитывается как $w_p = w + w_s$, где $w$ – вертикальная компонента скорости течения, а $w_s$ – скорость погружения или всплытия частицы МП, определяемая на основе ее плотности, размеров и формы. В этом исследовании рассматриваются частицы, близкие по форме к тонким цилиндрам, которые в первом приближении могут описывать волокна, составляющие более 90 % всего МП в поверхностных и подповерхностных слоях СЛО (Ross et al., 2021; Emberson-Marl et al., 2023). Для определения собственной скорости таких фрагментов пластика используется подход, предложенный в работе (Komar, 1980):

$$w_s\left(x,y,z,t\right)=0.079L^2\frac{1}{\mu}g\frac{\rho_p-\rho}{\rho}\cdot\left(\frac{L}{D}\right)^{-1.664}. \quad (1)$$

Здесь μ – динамическая вязкость, $g$ – сила тяжести, ρ – трехмерная плотность морской воды по результатам моделирования SibCIOM, $\rho_p$ – плотность частицы, $D$ – диаметр поперечного сечения цилиндра, $L$ – его длина.

### *Модель биообрастания микропластика*

Рассматривая биообрастание, которое приводит к увеличению средней плотности частиц и скорости их опускания, в работе Ирины Петровны Чубаренко с соавторами (Chubarenko et al., 2016) было показано, что для цилиндрических частиц и постоянной скорости обрастания, пропорциональной площади поверхности, время достижения частицы с биомассой плотности воды прямо пропорционально радиусу цилиндра. Основываясь на результатах этого исследования, в модели переноса–осаждения МП изменение плотности цилиндрических частиц при биообрастании рассчитывается по формуле:

$$\rho_p=\rho_0\frac{D^2}{\left(D+BT\right)^2}+\rho_b\left[1-\frac{D^2}{\left(D+BT\right)^2}\right],$$

где $\rho_0$ – плотность полимера, $\rho_b$ – плотность биопленки, равная в экспериментах 1.17 г/см$^3$ (как предложено в (Amaral-Zettler et al., 2021) в качестве средней плотности биопленок, образованных на пластике диатомовыми водорослями), $BT$ – толщина биопленки. При этом предполагается, что биопленка равномерно распределена по боковой поверхности цилиндра.

Для частиц, находящихся во льду, динамика биообрастания и толщина $BT$ формируются в зависимости от широты нахождения частицы в соответствии с графиками сезонной изменчивости биомассы водорослей во льду (Castellani et al., 2017), полученными на основе модельных расчетов. Межгодовая изменчивость этого процесса не предполагается.

Толщина биопленки на частицах, находящихся в водной среде, моделируется на основе использования подхода, описанного в работе (Kooi et al., 2017). Одномерная модель биообрастания была адаптирована для применения в условиях СЛО, а также к учету частиц цилиндрической формы. $BT$ определяется из суммарного объема частицы и биомассы $V_{tot}$:

$$BT=\sqrt{\frac{V_{tot}}{\pi L}}-\frac{D}{2}.$$

Объем биомассы зависит от количества клеток водорослей $A$ (на единицу площади поверхности) и составляет $V_b=V_AAS_0$, где $V_A=2\cdot10^{-16}$ м$^3$ – объем одной клетки (используется среднее значение объема клетки фитопланктона по данным, оцененным в (López-Sandoval et al., 2014)). С учетом того, что объем цилиндра $V_0=\pi\frac{D^2}{4}L$,

а площадь боковой поверхности $S_0 = \pi DL$, то толщину $BT$ можно рассчитать следующим образом:

$$BT = \sqrt{\frac{D^2}{4} + V_A AD} - \frac{D}{2}.$$

Параметризация формирования биопленки включает решение дифференциального уравнения изменения количества клеток водорослей $A$ на частице с учетом процессов жизнедеятельности фитопланктона в морской воде:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\beta_A A_w}{S_0} + \mu_A(T, I)A - m_A A - Q_{10}^{(T-20)/10} R_A A. \quad (2)$$

Первое слагаемое определяет накопление биомассы, вызванное столкновением частицы с клетками водорослей в окружающей среде ($A_w$ (число/м$^3$) – концентрация водорослей в воде, $\beta_A$ (м$^3$/с) – скорость столкновения). Второе слагаемое описывает размножение прикрепленных водорослей со скоростью роста $\mu_A$ (1/с), которая зависит от температуры воды $T$ (°C) и интенсивности проникающей радиации $I$ (μE/м$^2$/с). Последние два члена задают убывание массы биоты на частице за счет гибели клеток и дыхания: $m_A$ – скорость смертности или поглощения водорослей другими живыми организмами (1/с), $R_A$ – скорость дыхания (1/с), а коэффициент $Q_{10}$ показывает, насколько увеличивается скорость дыхания при повышении температуры на 10 °C. Согласно такой постановке, на определенной глубине, характеризующейся недостатком освещения и неблагоприятными температурными условиями для размножения клеток, процессы деградации превалируют над процессами накопления биопленки. Это способствует смене циклов погружения и всплытия частицы из-за изменения средней плотности агрегата. Конкретный выбор параметризаций слагаемых уравнения 2 или значений параметров (например, максимальной, минимальной и оптимальной температуры для размножения водорослей, доступности питательных веществ, скоростей смертности и потери биомассы вследствие дыхания) основан на эмпирических данных, полученных в лабораторных и натурных экспериментах, которые проводились в условиях, близких к условиям полярного региона. Подробное описание модели биообрастания частиц в водной среде и ледяном покрове СЛО и значения выбранных параметров представлены в нашей предыдущей работе (Golubeva, Gradova, 2024a).

Дополнительно параметризуется процесс осаждения МП с морскими агрегатами, включая фекальные гранулы зоопланктона. Согласно результатам численных экспериментов на основе модели земной системы промежуточной сложности с включением параметризации седиментации детрита (Kvale et al., 2020), расчетный глобальный экспорт МП на морское дно составляет от 0.06 % до 8.8 % от совокупного ежегодного объема пластикового загрязнения океана. Каждый год моделирования в детрит удаляется 5 % от общей массы загрязнения в океане, ожидающейся на конец текущего года (без учета частиц, осевших в предыдущие годы расчета). Удаление этой массы

происходит равномерно в течение года, при этом случайно выбранные частицы из тех, что находятся в океане (не попавшие ранее в осадок и не вмерзшие в морской лед), мгновенно оседают на морское дно в месте их нахождения.

## Результаты численного моделирования

В данном исследовании распространения в СЛО плавучего микропластика из Тихого и Атлантического океанов анализировалось поведение частиц цилиндрической формы, поступающих в Баренцево море из Норвежского моря и в Чукотское море через Берингов пролив в соответствии с расходом течений через проливы. Выброс частиц на берег или дополнительное поступление вдоль береговой линии не учитываются. Ввиду отсутствия точных данных о концентрации поступающего микропластика в Арктический бассейн через проливы, в численных экспериментах задавалось поступление около 300 частиц в год. Рассматривались частицы полипропилена (плотность 910 кг/м$^3$) цилиндрической формы двух размеров, а именно: а) длиной 0.5 мм, толщиной 1 мкм и б) длиной 5 мм, толщиной 50 мкм. Численные эксперименты проводились на период с 2016 по 2020 гг. Основные черты крупномасштабной циркуляции вод и морского льда, полученные на основе численного моделирования, представлены на рисунке 1.

На рисунках 2, 3 можно увидеть сезонное распределение в последний год расчета для всех частиц МП, выпущенных в течение анализируемого периода. Для иллюстрации особенностей распределения частиц разного размера в летний и зимний сезоны глубина нахождения частицы отмечена соответствующим цветом. Тихоокеанские частицы в основном концентрируются на шельфе Чукотского моря и на материковом склоне. Определенное количество частиц распространяется в море Бофорта вдоль побережья Аляски и достигают Канадской котловины. Из представленных рисунков видно, что глубина нахождения частиц меньшего размера мало меняется в зависимости от сезона (рисунки 2а, б). Из круговой диаграммы, показывающей процентное соотношение частиц, находящихся в определенном слое, следует, что в основном все частицы сосредоточены в слое от 30 до 70 м. Небольшое количество частиц (1 %) находится в ледяном покрове в августе, в декабре это число увеличивается до 5 %.

Распределение крупных тихоокеанских частиц показывает более концентрированную картину как для летнего (рисунок 3а), так и для зимнего сезонов (рисунок 3б). Области наибольшего скопления частиц включают Канадскую котловину, северные части Чукотского и Восточно-Сибирского морей. Находясь в поверхностном слое, частицы переносятся интенсивными поверхностными течениями, формирующимися под действием ветра, а зимой включаются в ледяной покров. Круговая диаграмма показывает значительное изменение глубины нахождения частицы в зависимости от сезона. Если в августе максимальное количество частиц находилось в 30-метровом слое и только 10 % частиц было включено в ледяной покров, то в декабре во льду оказалось 70 %.

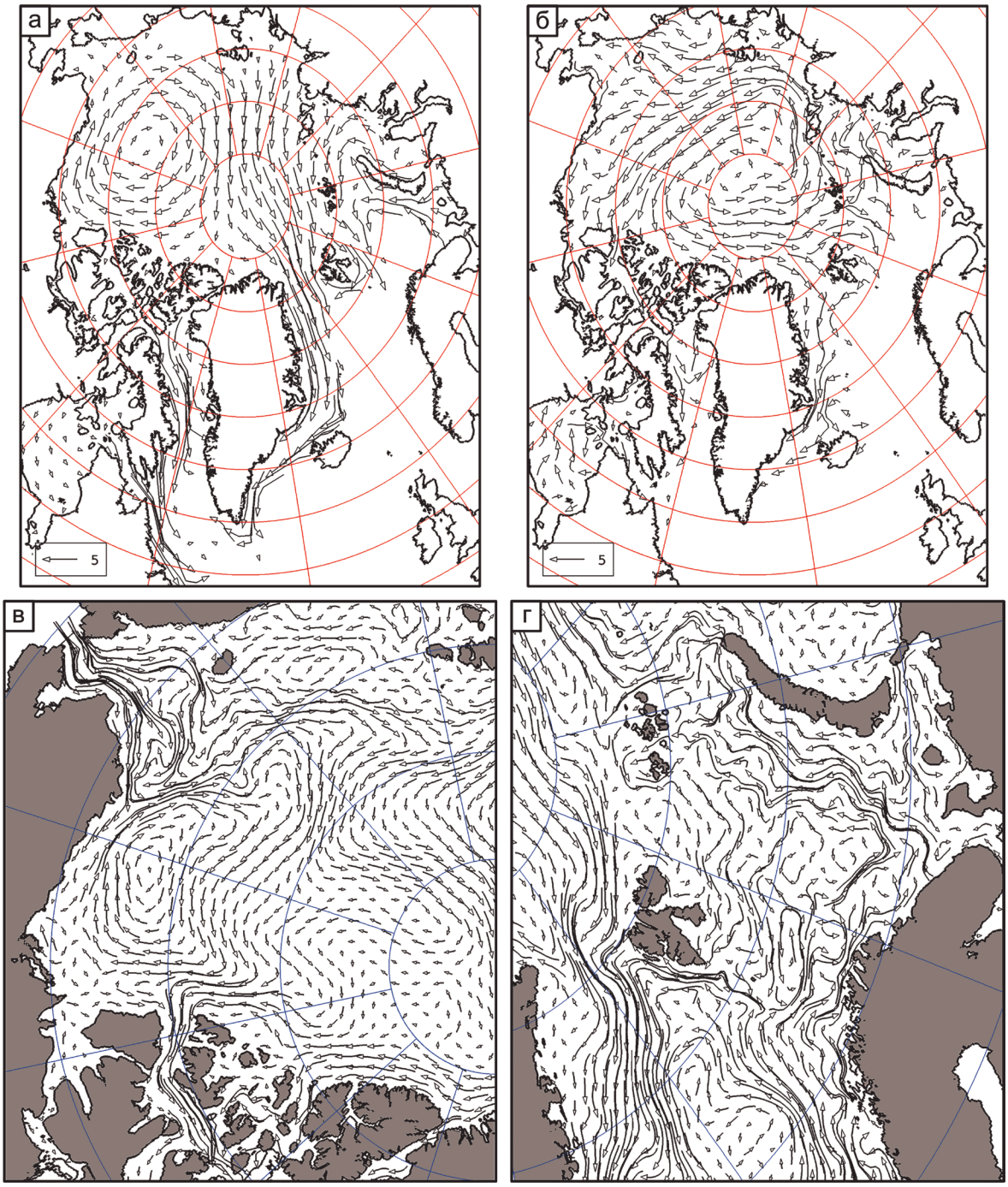



Рис. 1 – Осредненные результаты модельного расчета течений и дрейфа льда СЛО: некоторые варианты картины дрейфа льда, способствующего накоплению МП в Канадской котловине и Баренцевом море и характеризующего: **а** – антициклоническую циркуляцию; **б** – циклоническую циркуляцию; поле течений в верхнем 100-метровом слое: **в** – Канадский бассейн; **г** – Баренцево море

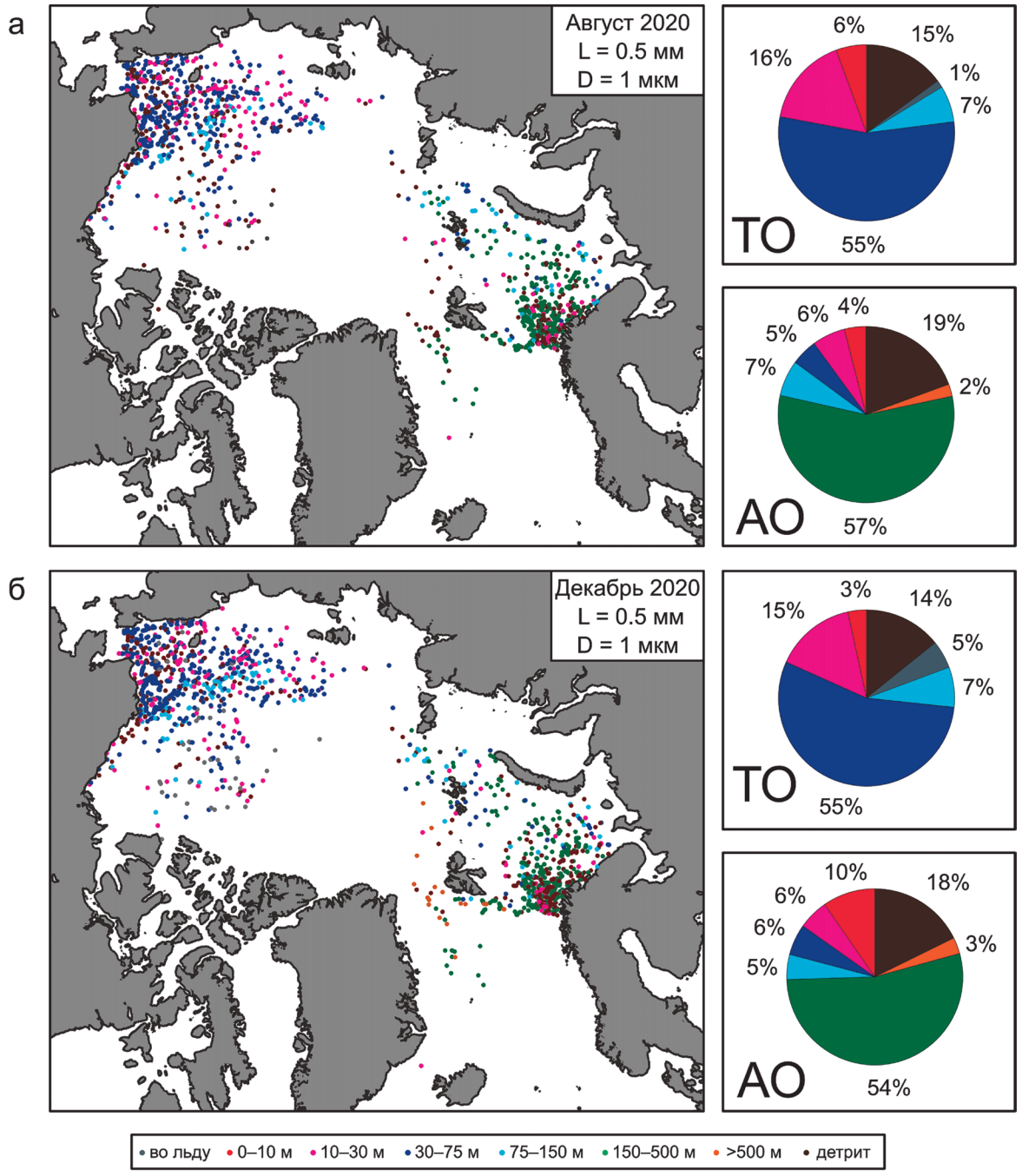



Рис. 2 – Пространственное распределение частиц МП длиной 0.5 мм, толщиной 1 мкм, поступивших на шельф Баренцева и Чукотского морей (атлантические и тихоокеанские частицы, соответственно) в течение расчетного периода 2016–2020 гг. в летний (**а**); зимний (**б**) сезон 2020 г. Цвет частицы определяется глубиной ее погружения, указанной на нижней панели. Круговые диаграммы представляют процентное соотношение частиц на разных глубинах для тихоокеанских (ТО) и атлантических частиц (АО)

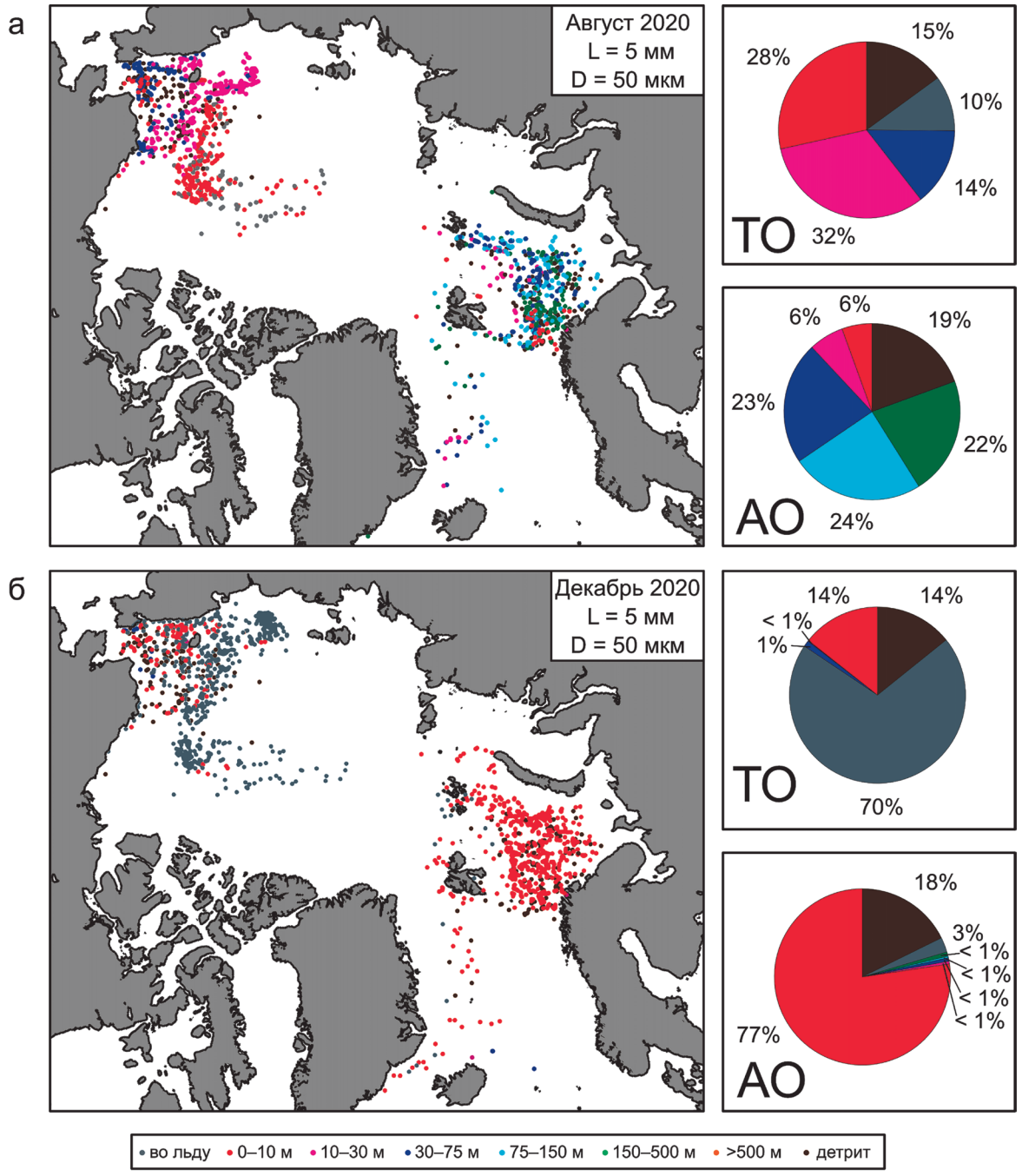



Рис. 3 – Пространственное распределение частиц МП длиной 5 мм, толщиной 50 мкм, поступивших на шельф Баренцева и Чукотского морей (атлантические и тихоокеанские частицы, соответственно) в течение расчетного периода 2016–2020 гг. в летний (**а**); зимний (**б**) сезон 2020 г. Цвет частицы определяется глубиной ее погружения, указанной на нижней панели. Круговые диаграммы представляют процентное соотношение частиц на разных глубинах для тихоокеанских (ТО) и атлантических частиц (АО)

Атлантические частицы в основном остаются в пределах Баренцева моря. Часть частиц, вышедшая за его пределы, фиксируется на материковом склоне и в Гренландском море. Как было отмечено в работах (Golubeva, Gradova, 2024a; Golubeva, Gradova, 2024b),

это обусловлено не только поступлением загрязнения из соседних акваторий и с речным стоком, но и системой дрейфа морского льда глубоководной части арктического бассейна и циркуляции вод самого моря, способствующих накоплению МП (рисунок 1б, г). Из картины пространственного распределения и круговых диаграмм на рисунках 2, 3 следует, что глубина погружения у атлантических частиц больше, чем у тихоокеанских. Это объясняется прохождением теплых атлантических вод через Баренцево море и формированием благоприятных условий для нарастания биомассы. Для атлантических частиц малого размера нет значительных различий между летним и зимним распределением (рисунки 2а, б), также как и для тихоокеанских частиц. Более половины общего количества частиц находятся в слое глубже 150 м.

Пространственное распределение крупных атлантических частиц по акватории моря (рисунок 3) схоже с распределением мелких частиц (рисунок 2) в том, что их основная часть остается в Баренцевом море. Значительным отличием от мелких частиц является глубина погружения как в летний, так и в зимний периоды. Мгновенный снимок на конец августа (рисунок 3а) показывает различную глубину погружения крупных частиц, в то же время мелкие частицы преимущественно находятся в одном слое (рисунок 2а). Наибольшим отличием в сезонном распределении крупных и мелких атлантических частиц является выход крупных частиц на поверхность в зимний период (77 %), что, как будет показано далее, связано с отмиранием биопленки. Можно также отметить, что, вследствие нахождения в поверхностном слое моря в зимний период, крупные атлантические частицы, выйдя за пределы Баренцева моря, распространяются в системе течений и дрейфа льда Гренландского моря и выносятся за пределы Датского пролива.

Отмеченные различия в распространении частиц разного размера обусловлены состоянием среды, в которой находятся частицы, интенсивностью и направлением дрейфа льда (рисунок 1а, б) и океанических течений (рисунок 1в, г), температурой вод и интенсивностью биообрастания, зависящей от концентрации хлорофилла. Биообрастание способствует переходу частицы на другой вертикальный уровень, в результате чего скорость и направление движения частицы могут меняться в соответствии с трехмерной циркуляцией океана. Вмерзание в лед означает дальнейший перенос частицы в системе дрейфа льда, направление и скорость которого может значительно отличаться от циркуляции нижележащих океанических слоев.

Для уточнения особенностей переноса частицы МП далее приводятся пятилетние траектории двух различающихся размерами частиц полипропилена, выпущенных одновременно в Чукотском море, и двух аналогичных частиц, выпущенных в Баренцевом море. Рисунок 4а показывает, что траектории частиц разного размера, выпущенных одновременно в одном и том же месте, могут значительно различаться. Ранее в своих исследованиях на частицах сферической формы (Golubeva, Gradova, 2024a) мы показали, что траектория частицы в значительной степени зависит от глубины ее погружения, поскольку интенсивность течений и их направление на разных глубинах различаются. В настоящем исследовании для частиц цилиндрической формы этот вывод также

подтверждается. На рисунках 4б, 4в показана динамика роста/деградации биопленки на поверхности частицы и изменение их глубины погружения в соответствии с увеличением/уменьшением плотности частицы.

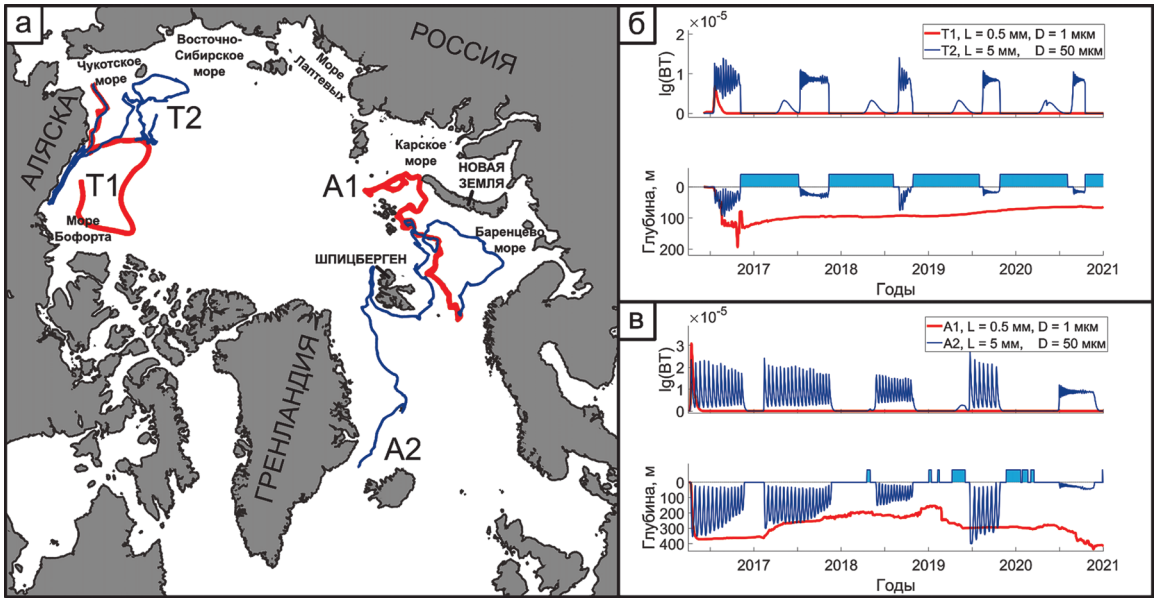



Рис. 4 – Траектории частиц разных размеров, выпущенных в Чукотское и Баренцево моря (**а**); динамика роста/деградации биопленки на поверхности частиц и изменение глубины погружения в соответствии с увеличением/уменьшением средней плотности частицы: **б** – тихоокеанские частицы; **в** – атлантические частицы. Модельный расчет 2016–2020 гг.

Тихоокеанская частица T1 (длина частицы 0.5 мм, толщина 1 мкм) значительно меньше по размерам частицы T2 (длина 5 мм, толщина 50 мкм). Обе частицы были выпущены в поверхностном слое Чукотского моря в мае 2016 г. Начальные отрезки траектории частиц полностью совпадают. Вследствие биообрастания в летний период, обе частицы опустились в нижележащий слой моря и перемещались с водами Аляскинского течения (рисунок 1в). Значительные различия в характере и глубине погружения частиц видны на рисунке 4б. Осциллирующий характер погружения–всплытия крупной частицы T2 в течение летнего периода определяется неоднократной сменой периодов накопления и деградации биопленки. Мелкой частице T1, несмотря на исчезновение биопленки, не удается подняться на поверхность, поскольку, как следует из формулы 1, ее собственная скорость подъема значительно меньше, чем у крупной частицы, а по результатам моделирования она оказывается сравнимой с вертикальной составляющей скорости течения.

Различия в глубине погружения определили дальнейшее расхождение траекторий частиц. Поднимаясь к поверхности, T2 продолжала движение вдоль шельфа. Полное исчезновение биопленки в осенний период привело к окончательному всплытию частицы к поверхности и ее вмерзанию в лед. В течение следующего года T2 продолжала находиться на шельфе Аляски: в летний период в океанических водах и в зимний – во

льду. Дальнейшая траектория частицы на рисунке 4а показывает перенос на материковый склон Чукотского и Восточно-Сибирского морей и возврат в глубоководную часть Канадского бассейна. Интенсивность вертикального перемещения частицы, вызванного динамикой биопленки на ее поверхности, зависит от климатических условий региона, в котором она оказалась. Нахождение частицы Т2 в поверхностном слое или во льду, где поле течений и дрейфа льда значительно зависят от атмосферной динамики, отразилось на сложной картине переноса частицы.

Частица Т1, достигшая придонного слоя вдольберегового течения, была вынесена в каньон Барроу, находящийся на границе Чукотского моря и моря Бофорта у берегов Аляски. На рисунке 4а приводится разворот траектории Т1, а на рисунке 4б можно увидеть ее резкое заглубление. Как показывают графики биообрастания и глубины нахождения частицы, ее подъем и погружение обусловлены системой течений (рисунок 1в), а не накоплением биопленки на поверхности. В дальнейшем траектория Т1 определялась антициклонической циркуляцией моря Бофорта. Находясь в 100-метровом слое океана, в течение расчетного периода она постепенно всплывала, но так и не достигла поверхности.

Частицы, выпущенные в Баренцево море (далее А1 – мелкая, А2 – крупная), находились на поверхности океана до наступления весны. В летний период интенсивное биообрастание привело к их погружению до глубины более 300 м (рисунок 4в), на которой прекратилось накопление биопленки. Ее деградация привела к последующему всплытию крупной частицы А2 и накоплению новой биопленки. В течение лета для А2 характерно осциллирующее вертикальное перемещение. В зимний период А2, потеряв полностью биопленку, находилась в поверхностных водах незамерзающей южной части Баренцева моря. Проведенное моделирование показывает, что в дальнейшем в зимний период А2 либо находилась в поверхностных водах, либо оказывалась вмерзшей в ледяной покров. И та, и другая среда характеризуются интенсивными течениями. В соответствии с их направлением частица А2, обогнув Шпицберген, включилась в поток Восточно-Гренландского течения и подошла к Датскому проливу (рисунки 1б,г, 4а).

Траектория мелкой частицы А1 в течение расчетного периода проходила по Баренцеву морю и закончилась на выходе в глубоководную часть Северного Ледовитого океана. Графики на рисунке 3в показывают, что после первого погружения и исчезновения биопленки частица находилась в морской среде, постепенно поднимаясь к поверхности аналогично частице Т1. Перемещение частицы по акватории (рисунок 4а) Баренцева моря формировалось в соответствии с направлением баренцевоморской ветви атлантических вод, а также придонных течений. Постепенный подъем частицы малого размера к поверхности происходит достаточно медленно и занимает несколько месяцев. В течение всего расчетного периода частица не поднялась до уровня, на котором бы появилась биопленка.

Проанализированные траектории пар частиц не являются единственно возможными или наиболее вероятными. В данном случае целью было показать, что частицы, различающиеся только размерами, могут быть перенесены системой океанических

течений и дрейфа льда в различные части океана. В ряде случаев частицы МП разных размеров могут перемещаться достаточно близко, особенно когда они находятся на шельфе в свободной от морского льда области, где поле течений в численной модели мало отличается по глубине.

Проведенный анализ формирования траекторий частиц и глубины их погружения, связанной с накоплением и деградацией биопленки, объясняет различия, полученные в распределении частиц на рисунках 2, 3. Такие результаты обусловлены глубиной погружения частицы в водную толщу или нахождением ее в ледяном покрове. Крупные частицы, теряя биопленку, быстро всплывают к поверхности, где, в зависимости от климатического состояния региона, они снова накапливают биомассу и погружаются вглубь моря или, оказавшись вмерзшими в лед, включаются в динамичную циркуляцию морского льда. Более мелкие частицы, опустившись на глубину, где усиливается отмирание биопленки, поднимаются также к поверхности. Однако скорость всплытия таких частиц сравнима с вертикальной скоростью течения, что приводит к длительному нахождению их в водной среде, циркуляция которой более устойчива по сравнению с дрейфом морского льда или течениями поверхностного слоя моря.

## Обсуждение

Представленные на основе численного моделирования результаты включают ряд упрощений, одними из которых являются рассчитанные с использованием крупномасштабной модели поля течений СЛО, не описывающие вихревую динамику. Тем не менее, полученные в рамках предложенного моделирования результаты, в частности области концентрации микропластика, находят подтверждение в исследованиях, основанных на анализе данных наблюдений. Несмотря на то, что западная часть СЛО, как правило, покрыта льдом в течение всего года, что затрудняет проведение исследований, данные ограниченных наблюдений в Чукотском море и море Бофорта показывают наличие микропластика в этих акваториях (Mu et al., 2019; Bergmann et al., 2022; D'Angelo et al., 2023; Ikenoue et al., 2023), что связывают с его поступлением со стороны Тихого океана. Как показывают результаты нашего моделирования, значительное количество частиц микропластика остается в акватории Чукотского моря в течение 5-летнего периода. В значительной степени это обусловлено циркуляцией поверхностных вод, в результате которой перемещение частиц имеет сложный характер, при котором возможен не только вынос частиц за пределы акватории моря, но и их возвращение в шельфовую область. В работе (Mu et al., 2019) также отмечается, что концентрация микропластика на шельфе Чукотского моря превышает его ежегодное поступление через Берингов пролив, что позволяет рассматривать Чукотский шельф как область временного накопления. Возможность переноса частиц микропластика в море Бофорта, показанную нашими расчетами, также подтверждают результаты (D'Angelo et al., 2023), в этой работе на основе проведенных исследований делается предположение о переносе микропластика в море Бофорта через каньон Барроу.

Результаты проведенных измерений в восточной части СЛО показывают, что Баренцево море является одной из наиболее загрязненных микропластиком акваторий Арктики и по некоторым оценкам даже Мирового океана (van Sebille et al., 2012; Lusher et al., 2015; Cózar et al., 2017; Tošić et al., 2020; Ершова и др., 2021; Yakushev et al., 2021; Emberson-Marl et al., 2023). Это связывают с поступлением загрязнения из Атлантического океана и с водами арктических рек, особенностями циркуляции воды и наличием районов интенсивного судоходства. Результаты проведенного моделирования показывают, что по прошествии пяти лет численного расчета большая часть частиц остается на шельфе Баренцева моря. Ранее в своих работах (Golubeva, Gradova, 2024b) мы также отмечали, что длительному удержанию микропластика в Баренцевом море способствует система дрейфа льда и циркуляции вод. Дополнительным подтверждением этого является приведенная траектория для частицы A2 на рисунке 4а.

Следует отметить, что в настоящий момент самым определенным блоком в численной модели является лагранжев перенос частиц. Параметризация некоторых ключевых процессов требует уточнения на основе исследований, проведенных в полевых или лабораторных условиях, приближенных к условиям СЛО.

Одним из основных моментов численного моделирования переноса частиц является определение скорости погружения–всплытия частиц микропластика определенной формы и размера. При проведении настоящего исследования использовалась формула 1 (Komar, 1980), рекомендованная в работе (Dittmar et al., 2024). Применение этой формулы ограничено малыми числами Рейнольдса (Re = 2). При проведении численных экспериментов с частицами крупного размера (длиной 5 мм, толщиной 50 мкм) возникали ситуации, когда число Рейнольдса превышало эту отметку. Дополнительно проведенные расчеты с использованием формулы (Khatmullina, Isachenko, 2017) показали, что модельные распределения больших частиц (длина 5 мм, толщина 50 мкм) через 5 лет, посчитанные по обеим формулам, достаточно близки (результаты не приводятся). В то же время, распределения PP частиц меньшего размера (длина 0.5 мм, толщина 1 мкм) значительно различаются. По формуле из работы (Khatmullina, Isachenko, 2017) пространственное распределение для мелких и больших частиц легкого микропластика PP, поступивших через Берингов пролив, различается незначительно в отличие от варианта с использованием формулы (Komar, 1980).

Дополнительно следует отметить необходимость анализа данных о составе биопленки, формирующейся на МП в Арктике, а также оценки влияния климатических и биогеохимических факторов на интенсивность накопления и разрушения биопленки на поверхности частицы (например, максимальная, минимальная и оптимальная температуры для размножения водорослей, доступность питательных веществ, уровень смертности и потери биомассы вследствие дыхания). Изменения термического режима жизнедеятельности водорослей приводят к сдвигу сроков формирования биопленки на частицах микропластика. Предварительный анализ чувствительности переноса частиц микропластика в арктических морях в зависимости от изменения термического режима жизнедеятельности водорослей включал численный эксперимент, в котором максимальная, минимальная и оптимальная температуры были повышены на один

градус (результаты не приводятся). Сравнение с базовым экспериментом показало, что для каждой отдельной частицы изменения траектории могут быть достаточно большими, вплоть до смены направления движения. Отмечено также изменение процентного состава нахождения частиц в определенном океаническом слое. При этом завершающая картина распределения частиц после пятилетнего расчета меняется незначительно и основные выводы остаются неизменными.

Уточнения требует также параметризация темпов вмерзания частиц МП в морской лед и интенсивности биообрастания при нахождении частицы во льду. В настоящем исследовании при моделировании этих процессов использовались опубликованные в научной литературе результаты единичных лабораторных экспериментов и анализа полевых наблюдений, проведенных в ходе отдельных экспедиций для ограниченных арктических акваторий.

Подробный анализ использования различных формул вычисления вертикальной скорости частиц микропластика, а также чувствительности к параметризации биохимических процессов при численном моделировании переноса океаническими течениями, не являлся целью данной работы и может служить темой отдельной публикации.

## Заключение

В настоящем исследовании проведены постановочные численные эксперименты, моделирующие перенос–осаждение частиц плавучего микропластика, поступающего на шельф Чукотского моря с тихоокеанскими водами и в Баренцево море с атлантическими водами. С учетом использования результатов расчета крупномасштабной модели океана и морского льда проанализированы особенности погружения в океаническую толщу полипропиленовых цилиндрических частиц разных размеров, отмечены различия в траекториях распространения частиц.

Перенос МП в океанических водах определяется системой циркуляции региона, но в полярных акваториях наличие движущегося ледяного покрова существенно влияет на траекторию движения пластиковых частиц. Процессы биообрастания и деградации биопленки, формирующейся на поверхности МП, являются ключевыми, определяющими глубину погружения частиц плавучего МП в океанических водах, что приводит к различным траекториям частиц, находящихся на разных глубинах в меняющемся океаническом потоке. Кроме процесса биообрастания, определяемого природными условиями региона, глубина погружения частиц, а также интенсивность вертикального перемещения в водной толще МП одного вида, существенно зависит от размера частиц.

Результаты постановочных численных экспериментов показали, что антициклонический круговорот Канадского бассейна, материковый склон Чукотского моря и Баренцево море являются потенциальными областями накопления МП в Северном Ледовитом океане в соответствии с системой циркуляции вод и дрейфа льда.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, грант № 25-21-00585. Численные расчеты проведены на ЦКП ССКЦ СО РАН. Авторы благодарят анонимных рецензентов за конструктивные замечания.

## Список литературы

1. *Ершова А. А., Еремина Т. Р., Дунаев А. Л., Макеева И. Н., Татаренко Ю. А.* Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 164–177. EDN: UVXOVZ. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-164-177
2. *Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И., Исаченко И. А., Буканова Т. В.* Микропластик в морской среде. М.: Научный мир, 2021. 520 с. EDN: ROUYQE
3. *Aksenov Y., Karcher M., Proshutinsky A., Gerdes R., de Cuevas B., Golubeva E., Kauker F., Nguyen A. T., Platov G., Wadley M., Watanabe E., Coward A. C., Nurser A. J. G.* Arctic pathways of Pacific Water: Arctic Ocean Model Intercomparison experiments // JGR Ocean. 2016. Vol. 121. No. 1. P. 27–59. EDN: UMQCBW. https://doi.org/10.1002/2015JC011299
4. *Amaral-Zettler L. A., Zettler E. R., Mincer T. J., Klaassen M. A., Gallager S. M.* Biofouling impacts on polyethylene density and sinking in coastal waters: A macro/micro tipping point? // Water Res. 2021. Vol. 201. P. 117289. EDN: DRUQJA. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117289
5. *Andrady A. L.* Microplastics in the marine environment // Marine Pollution Bulletin. 2011. Vol. 62. Iss. 8. P. 1596–1605. EDN: ULRKUK. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
6. *Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I.* Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 599–600. P. 560–571. EDN: XNFCTW. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185
7. *Barnes D., Galgani F., Thompson R., Barlaz M.* Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments // Philos. Trans. R. Soc. B. 2009. Vol. 364. P. 1985–1998. https://doi.org/10.1098/RSTB.2008.0205
8. *Berezina A., Yakushev E., Savchuk O., Vogelsang C., Staalstrom A.* Modelling the Influence from Biota and Organic Matter on the Transport Dynamics of Microplastics in the Water Column and Bottom Sediments in the Oslo Fjord // Water. 2021. Vol 13. Iss. 19. Art. 2690. EDN: LDKMSP. https://doi.org/10.3390/w13192690
9. *Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen G. W., Provencher J. F., Rochman C. M., van Sebille E., Tekman M. B.* Plastic pollution in the Arctic // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. Vol. 3. P. 323–337. EDN: RSOGAW. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00279-8
10. *Bitz C. M., Lipscomb W. H.* An energy-conserving thermodynamic model of sea ice // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. No. C7. P. 15669–15677. https://doi.org/10.1029/1999JC900100
11. *Carbery M., O'Connor W., Palanisami T.* Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health // Environment International. 2018. Vol. 115. P. 400–409. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.007
12. *Castellani G., Losch M., Lange B. A., Flores H.* Modeling Arctic sea-ice algae: Physical drivers of spatial distribution and algae phenology // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. Vol. 122. P. 7466–7487. EDN: YGONTB. https://doi.org/10.1002/2017JC012828
13. *Chen X., Xiong X., Jiang X., Shi H., Wu C.* Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake // Chemosphere. 2019. Vol. 222. P. 856–864. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.015

14. *Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E.* On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2016. Vol. 108. No. 1–2. P. 105–112. EDN: WWHIMN. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.048
15. *Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T. S.* Microplastics as a contaminant in the marine environment: A review // Marine Pollution Bulletin. 2011. Vol. 62. Iss. 12. P. 2588–2597. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
16. *Cózar A., Martí E., Duarte C. M., García-de-Lomas J., Van Sebille E., Ballatore T. J., Eguíluz V. M., González-Gordillo J. I., Pedrotti M. L., Echevarría F., Troublè R., Irigoien X.* The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // Sci. Adv. 2017. Vol. 3. Iss. 4. P. e1600582. EDN: YDCPDN. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600582
17. *D'Angelo A., Trenholm N., Loose B., Glastra L., Strock J., Kim J.* Microplastics Distribution within Western Arctic Seawater and Sea Ice // Toxics. 2023. Vol. 11. Iss. 9. P. 792. EDN: KCYRSB. https://doi.org/10.3390/toxics11090792
18. *Dittmar S., Ruhl A. S., Altmann K., Jekel M.* Settling Velocities of Small Microplastic Fragments and Fibers // Environ. Sci. Technol. 2024. Vol. 58. Iss. 14. P. 6359–6369. EDN: VWKJTQ. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09602
19. *Emberson-Marl H., Coppock R. L., Cole M., Godley B. J., Mimpriss N., Nelms S. E., Lindeque P. K.* Microplastics in the Arctic: a transect through the Barents Sea // Front. Mar. Sci. 2023. Vol. 10. No. 1241829. EDN: OPNIZP. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1241829
20. *Eriksen M., Lebreton L. C.-M., Carson H. S., Thiel M., Moore C. J., Borerro J. C., Galgani F., Ryan P. G., Reisser J.* Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea // PLoS ONE. 2014. Vol. 9. Iss. 12. No. e111913. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913
21. *Fazey F. M., Ryan P. G.* Biofouling on buoyant marine plastics: An experimental study into the effect of size on surface longevity // Environ. Pollut. 2016. Vol. 210. P. 354–360. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.026
22. *Fischer R., Lobelle D., Kooi M., Koelmans, A., Onink V., Laufkötter C., Amaral-Zettler L., Yool A., van Sebille E.* Modelling submerged biofouled microplastics and their vertical trajectories // Biogeosciences. 2022. Vol. 19. P. 2211–2234. EDN: UQBASZ. https://doi.org/10.5194/bg-19-2211-2022
23. *Golubeva E., Gradova M.* Integrating Biofilm Growth and Degradation into a Model of Microplastic Transport in the Arctic Ocean // Appl. Sci. 2024a. Vol. 14. No. 22. P. 10229. EDN: FBJNQY. https://doi.org/10.3390/app142210229
24. *Golubeva E., Gradova M.* Numerical Study of the Riverine Microplastic Distribution in the Arctic Ocean // Water. 2024b. Vol. 16. Iss. 3. No. 441. EDN: TJSHIF. https://doi.org/10.3390/w16030441
25. *Golubeva E., Kraineva M., Platov G., Iakshina D., Tarkhanova M.* Marine heatwave in Siberian Arctic Seas and adjacent region // Remote Sens. 2021. Vol. 13. P. 4436. https://doi.org/10.3390/rs13214436
26. *Golubeva E., Platov G.* Numerical modeling of the Arctic Ocean ice system response to variations in the atmospheric circulation from 1948 to 2007 // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 137–151. EDN: LLXFSB. https://doi.org/10.1134/S0001433809010095
27. *Golubeva E., Platov G.* On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. No. 4. P. C04S05. EDN: KODDKA. https://doi.org/10.1029/2006JC003734
28. *Gradova M., Golubeva E.* Evaluation of the Riverine Heat Influx Impact on the Arctic Ice Cover Based on Numerical Modeling // Russ. Meteorol. Hydrol. 2023. Vol. 48. P. 639–644. EDN: VGKAFQ. https://doi.org/10.3103/S1068373923070117

29. *Halsband C., Herzke D.* Plastic litter in the European Arctic: What do we know? // Emerging Contaminants. 2019. Vol. 5. P. 308–318. EDN: QFWTYC. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.11.001
30. *Herzke D., Ghaffari P., Sundet J. H., Tranang C. A., Halsband C.* Microplastic Fiber Emissions From Wastewater Effluents: Abundance, Transport Behavior and Exposure Risk for Biota in an Arctic Fjord // Front. Environ. Sci. 2021. Vol. 9. No. 662168. EDN: IDSSAF. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.662168
31. *Hunke E. C., Dukowicz J. K.* An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // J. Phys. Oceanogr. 1997. Vol. 27. Iss. 9. P. 1849–1867. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027%3C1849:AEVPMF%3E2.0.CO;2
32. *Huserbråten M. B. O., Hattermann T., Broms C., Albretsen J.* Trans-polar drift-pathways of riverine European microplastic // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. No. 3016. EDN: FMTOTM. https://doi.org/10.1038/s41598-022-07080-z
33. *Ikenoue T., Nakajima R., Mishra P., Ramasamy E. V., Fujiwara A., Nishino S., Murata A., Watanabe E., Itoh M.* Floating microplastic inventories in the southern Beaufort Sea, Arctic Ocean // Front. Mar. Sci. 2023. Vol. 10. Art. 1288301. EDN: ULVTKR. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1288301
34. *Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K. L.* Plastic waste inputs from land into the ocean // Science. 2015. Vol. 347. Iss. 6223. P. 768–771. https://doi.org/10.1126/science.1260352
35. *Kaiser D., Kowalski N., Waniek J. J.* Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics // Environ. Res. Lett. 2017. Vol. 12 (12). Art. 124003. EDN: VDIYEE. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8e8b
36. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Roy J., Dennis J.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77 (3). P. 437–470. EDN: SNBWXR. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2
37. *Khatmullina L., Isachenko I.* Settling velocity of microplastic particles of regular shapes // Marine Pollution Bulletin. 2017. Vol. 114. Iss. 2. P. 871–880. EDN: EYBLMI. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.024
38. *Komar P. D.* Settling Velocities of Circular Cylinders at Low Reynolds Numbers // J. Geol. 1980. Vol. 88. No. 3. P. 327–336. https://doi.org/10.1086/628510
39. *Kooi M., van Nes E. H., Scheffer M., Koelmans A. A.* Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics // Environ. Sci. Technol. 2017. Vol. 51. No. 14. P. 7963–7971. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04702
40. *Kvale K. F., Friederike Prowe A. E., Oschlies A. A* Critical Examination of the Role of Marine Snow and Zooplankton Fecal Pellets in Removing Ocean Surface Microplastic // Front. Mar. Sci. 2020. Vol. 6. No. 808. EDN: SPACZF. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00808
41. *Lebreton L. C.-M., Greer S. D., Borrero J. C.* Numerical modelling of floating debris in the world's oceans // Marine Pollution Bulletin. 2012. Vol. 64. Iss. 3. P. 653–661. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.027
42. *Lipscomb W. H., Hunke E. C.* Modeling Sea Ice Transport Using Incremental Remapping // Mon. Weather Rev. 2004. Vol. 132. Iss. 6. P. 1341–1354. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132%3C1341:MSITUI%3E2.0.CO;2
43. *Lobelle D., Kooi M., Koelmans A. A., Laufkötter C., Jongedijk C. E., Kehl C., van Sebille E.* Global Modeled Sinking Characteristics of Biofouled Microplastic // J. Geophys. Res. Ocean. 2021. Vol. 126. Iss. 4. No. e2020JC017098. EDN: WNKPCT. https://doi.org/10.1029/2020JC017098
44. *López-Sandoval D. C., Rodríguez-Ramos T., Cermeño P., Sobrino C., Marañón E.* Photosynthesis and respiration in marine phytoplankton: Relationship with cell size, taxonomic affiliation, and

growth phase // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2014. Vol. 457. P. 151–159. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.04.013

45. *Lusher A. L., Tirelli V., O'Connor I., Officer R.* Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. No. 14947. EDN: VELTPJ. https://doi.org/10.1038/srep14947
46. *Martyanov S. D., Isaev A. V., Ryabchenko V. A.* Model estimates of microplastic potential contamination pattern of the eastern Gulf of Finland in 2018 // Oceanology. 2023. Vol. 65. P. 86–99. EDN: MVMVLQ. https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.11.006
47. *Mato Y., Isobe T., Takada H., Kanehiro H., Ohtake C., Kaminuma T.* Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment // Environmental Science & Technology. 2001. Vol. 35. Iss. 2. P. 318–324. https://doi.org/10.1021/es0010498
48. *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. Vol. 124. No. 12. P. 8558–8573. EDN: UCCNST. https://doi.org/10.1029/2019JC015050
49. *Mountford A. S., Morales Maqueda M. A.* Modeling the accumulation and transport of microplastics by sea ice // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. Vol. 126. No. 2. Art. e2020JC016826. EDN: IZIYTB. https://doi.org/10.1029/2020JC016826
50. *Murawski J., She J., Frishfelds V.* Modeling drift and fate of microplastics in the Baltic Sea // Front. Mar. Sci. 2022. Vol. 9. Art. 886295. EDN: GVKZFM. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.886295
51. *Mu J., Zhang S., Qu L., Jin F., Fang C., Ma X., Zhang W., Wang J.* Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea // Marine Pollut. Bull. 2019. Vol. 143. P. 58–65. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.023
52. *Obbard R. W., Sadri S., Wong Y. Q., Khitun A. A., Baker I., Thompson R. C.* Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // Earth's Future. 2014. Vol. 2. Iss. 6. P. 315–320. https://doi.org/10.1002/2014EF000240
53. *Osinski R. D., Enders K., Gräwe U., Klingbeil K., Radtke H.* Model uncertainties of a storm and their influence on microplastics and sediment transport in the Baltic Sea // Ocean Sci. Discuss. 2020. Vol. 16. No. 6. P. 1491–1507. EDN: APJEQI. https://doi.org/10.5194/os-16-1491-2020
54. *Peeken I., Primpke S., Beyer B., Gütermann J., Katlein C., Krumpen T., Bergmann M., Hehemann L., Gerdts G.* Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic // Nature Communications. 2018. Vol. 9. Art. 1505. EDN: YGWQTZ. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5
55. *Proshutinsky A., Krishfield R., Toole J. M., Timmermans M.-L., Williams W., Zimmermann S., Yamamoto-Kawai M., Armitage T. W. K., Dukhovskoy D., Golubeva E., Manucharyan G. E., Platov G., Watanabe E., Kikuchi T., Nishino S., Itoh M., Kang S.-H., Cho K.-H., Tateyama K., Zhao J.* Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018 // JGR Ocean. 2019. Vol. 124. P. 9658–9689. EDN: ZYMMLK. https://doi.org/10.1029/2019JC015281
56. *Rey A., Ghazizadeh M., Pilechi A.* Microplastic Pathways in the Arctic: Integrating the TELEMAC-3D Hydrodynamic Model with Advanced Ray Tracing Particle Tracking. In: Coelho C., Hallin C., Sancho F., Silva P. A. (eds) Coastal Dynamics 2026. CD 2025. Coastal Research Library. Vol. 42. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-15477-4_44
57. *Ross P. S., Chastain S., Vassilenko E., Etemadifar A., Zimmermann S., Quesnel S.-A., Eert J., Solomon E., Patankar S., Posacka A. M., Williams B.* Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic inputs // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. Art. 106. EDN: VHPDJL. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20347-1
58. *Schernewski G., Radtke H., Hauk R., Baresel C., Olshammar M., Osinski R., Oberbeckmann S.* Transport and Behavior of Microplastics Emissions From Urban Sources in the Baltic Sea // Front. Environ. Sci. 2020. Vol. 8. P. 579361. EDN: DHSGMP. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579361

59. *Teuten E. L., Saquing J. M., Knappe D. R., Barlaz M. A., Jonsson S., Björn A., Rowland S. J., Thompson R. C., Galloway T. S., Yamashita R., Ochi D., Watanuki Y., Moore C., Viet P. H., Tana T. S., Prudente M., Boonyatumanond R., Zakaria M. P., Akkhavong K., Ogata Y., Hirai H., Iwasa S., Mizukawa K., Hagino Y., Imamura A., Saha M., Takada H.* Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol Sci. 2009. Vol. 364. Art. 1526. P. 2027–2045. EDN: MLOSGX. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284
60. *Tošić T. N., Vruggink M., Vesman A.* Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas // Mar. Pollut. Bull. 2020. Vol. 161. No. 111745. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111745
61. *Van Sebille E., England M. H., Froyland G.* Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // Environ. Res. Lett. 2012. Vol. 7. No. 4. Art. 044040. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040
62. *Wright S. L., Thompson R. C., Galloway T. S.* The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review // Environmental Pollution. 2013. Vol. 178. P. 483–492. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031
63. *Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I.* Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // Commun. Earth Environ. 2021. Vol. 2. Art. 23. EDN: FNNWSG. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00091-0

Статья поступила в редакцию 15.05.2026, одобрена к печати 25.08.2026.
**Для цитирования:** *Градова М. А., Голубева Е. Н.* Численное моделирование переноса микропластика в арктических водах // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 3. С. 147–172. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).8

## NUMERICAL MODELING OF MICROPLASTIC TRANSPORT IN ARCTIC WATERS

**M. A. Gradova, E. N. Golubeva**

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,*
*6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia,*
*e-mail: gradova.ma.22@gmail.com*

In order to analyse the transport of microplastics in the waters of the Arctic Ocean and identify areas of potential particle concentration, this study employs three-dimensional numerical modelling, a tool that has been proven to be effective for scientific research into water pollution, complementing environmental monitoring. The numerical model enables the calculation of particle trajectories using a Lagrangian transport model, accounting for seasonal variations in environmental conditions, such as the direction and velocity of currents and ice drift, the thermohaline state of the ocean, and the intensity of biofilm accumulation and degradation processes on the surface of microplastics. The present study analyses the characteristics of the distribution in Arctic waters of floating microplastics originating from the Pacific and Atlantic Oceans. The presence of a moving ice cover has been identified as a significant factor influencing the trajectory of plastic particles in polar waters. Furthermore, biofouling processes have been shown to play a determinative role in the depth to which floating particles sink. The results of simulated numerical experiments also indicated that the anticyclonic circulation of the Canadian

Basin, the continental slope of the Chukchi Sea, and the Barents Sea are areas of potential microplastic accumulation in the Arctic Ocean, in accordance with the water circulation system and ice drift.

**Keywords:** microplastics, ocean pollution, Arctic Ocean, numerical modeling, Lagrangian transport, biofouling of microplastics

**Acknowledgment:** This research was supported by an RSF grant No. 25-21-00585. Numerical calculations were performed at the Supercomputing Center SB RAS.

## References

1. Aksenov, Y., M. Karcher, A. Proshutinsky, R. Gerdes, B. de Cuevas, E. Golubeva, F. Kauker, A. T. Nguyen, G. Platov, M. Wadley, E. Watanabe, A. C. Coward, and A. J. G. Nurser, 2016: Arctic pathways of Pacific Water: Arctic Ocean Model Intercomparison experiments. *JGR Ocean*, **121** (1), 27–59, EDN: UMQCBW, https://doi.org/10.1002/2015JC011299
2. Amaral-Zettler, L. A., E. R. Zettler, T. J. Mincer, M. A. Klaassen, and S. M. Gallager, 2021: Biofouling impacts on polyethylene density and sinking in coastal waters: A macro/micro tipping point? *Water Res.*, **201**, 117289, EDN: DRUQJA, https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117289
3. Andrady, A. L., 2011: Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, **62** (8), 1596–1605, EDN: ULRKUK, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
4. Bagaev, A., A. Mizyuk, L. Khatmullina, I. Isachenko, and I. Chubarenko, 2017: Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion. *Science of The Total Environment*, **599**–**600**, 560–571, EDN: XNFCTW, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185
5. Barnes, D., F. Galgani, R. Thompson, and M. Barlaz, 2009: Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. B.*, **364**, 1985–1998, https://doi.org/10.1098/RSTB.2008.0205
6. Berezina, A., E. Yakushev, O. Savchuk, C. Vogelsang, and A. Staalstrom, 2021: Modelling the Influence from Biota and Organic Matter on the Transport Dynamics of Microplastics in the Water Column and Bottom Sediments in the Oslo Fjord. *Water*, **13** (19), 2690, EDN: LDKMSP, https://doi.org/10.3390/w13192690
7. Bergmann, M., F. Collard, J. Fabres, G. W. Gabrielsen, J. F. Provencher, C. M. Rochman, E. van Sebille, and M. B. Tekman, 2022: Plastic pollution in the Arctic. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **3**, 323–337, EDN: RSOGAW, https://doi.org/10.1038/s43017-022-00279-8
8. Bitz, C. M. and W. H. Lipscomb, 1999: An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res.*, **104** (C7), 15669–15677, https://doi.org/10.1029/1999JC900100
9. Carbery, M., W. O'Connor, and T. Palanisami, 2018: Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment International*, **115**, 400–409, https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.007
10. Castellani, G., M. Losch, B. A. Lange, and H. Flores, 2017: Modeling Arctic sea-ice algae: Physical drivers of spatial distribution and algae phenology. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122**, 7466–7487, EDN: YGONTB, https://doi.org/10.1002/2017JC012828
11. Chen, X., X. Xiong, X. Jiang, H. Shi, and C. Wu, 2019: Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake. *Chemosphere*, **222**, 856–864, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.015

12. Chubarenko, I., A. Bagaev, M. Zobkov, and E. Esiukova, 2016: On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. *Mar. Pollut. Bull.*, **108** (1–2), 105–112, EDN: WWHIMN, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.048
13. Chubarenko, I. P., E. E. Esiukova, L. I. Khatmullina, O. I. Lobchuk, I. A. Isachenko, and T. V. Bukanova, 2021: Mikroplastik v morskoj srede (Microplastics in water environment). Moscow, Scientific World Publishing House, 520 p., EDN: ROUYQE [in Russian].
14. Cole, M., P. Lindeque, C. Halsband, and T. S. Galloway, 2011: Microplastics as a contaminant in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, **62** (12), 2588–2597, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
15. Cózar, A., E. Martí, C. M. Duarte, J. García-de-Lomas, E. Van Sebille, T. J. Ballatore, V. M. Eguíluz, J. I. González-Gordillo, M. L. Pedrotti, F. Echevarría, R. Troublè, and X. Irigoien, 2017: The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Sci. Adv.*, **3** (4), e1600582, EDN: YDCPDN, https://doi.org/10.1126/sciadv.1600582
16. D'Angelo, A., N. Trenholm, B. Loose, L. Glastra, J. Strock, and J. Kim, 2023: Microplastics Distribution within Western Arctic Seawater and Sea Ice. *Toxics*, **11** (9), 792, EDN: KCYRSB, https://doi.org/10.3390/toxics11090792
17. Dittmar, S., A. S. Ruhl, K. Altmann, and M. Jekel, 2024: Settling Velocities of Small Microplastic Fragments and Fibers. *Environ. Sci. Technol.*, **58** (14), 6359–6369, EDN: VWKJTQ, https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09602
18. Emberson-Marl, H., R. L. Coppock, M. Cole, B. J. Godley, N. Mimpriss, S. E. Nelms, and P. K. Lindeque, 2023: Microplastics in the Arctic: a transect through the Barents Sea. *Front. Mar. Sci.*, **10**, 1241829, EDN: OPNIZP, https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1241829
19. Eriksen, M., L. C.-M. Lebreton, H. S. Carson, M. Thiel, C. J. Moore, J. C. Borerro, F. Galgani, P. G. Ryan, and J. Reisser, 204: Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*, **9** (12), e111913, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913
20. Ershova, A. A., T. R. Eremina, A. L. Dunayev, I. N. Makeeva, and Yu. A. Tatarenko, 2021: Study of microplastic pollution in the seas of the Russian Arctic and the Far East. *Arctic: Ecology and Economy*, **11** (2), 164–177, EDN: UVXOVZ, https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-164-177 [in Russian].
21. Fazey, F. M. and P. G. Ryan, 2016: Biofouling on buoyant marine plastics: An experimental study into the effect of size on surface longevity. *Environ. Pollut.*, **210**, 354–360, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.026
22. Fischer, R., D. Lobelle, M. Kooi, A. Koelmans, V. Onink, C. Laufkötter, L. Amaral-Zettler, A. Yool, and E. van Sebille, 2022: Modelling submerged biofouled microplastics and their vertical trajectories. *Biogeosciences*, **19**, 2211–2234, EDN: UQBASZ, https://doi.org/10.5194/bg-19-2211-2022
23. Golubeva, E. and M. Gradova, 2024a: Integrating Biofilm Growth and Degradation into a Model of Microplastic Transport in the Arctic Ocean. *Appl. Sci.*, **14** (22), 10229, EDN: FBJNQY, https://doi.org/10.3390/app142210229
24. Golubeva, E. and M. Gradova, 2024b: Numerical Study of the Riverine Microplastic Distribution in the Arctic Ocean. *Water*, **16** (3), 441, EDN: TJSHIF, https://doi.org/10.3390/w16030441
25. Golubeva, E., M. Kraineva, G. Platov, D. Iakshina, and M. Tarkhanova, 2021: Marine heatwave in Siberian Arctic Seas and adjacent region. *Remote Sens.*, **13**, 4436, https://doi.org/10.3390/rs13214436
26. Golubeva, E. and G. Platov, 2009: Numerical modeling of the Arctic Ocean ice system response to variations in the atmospheric circulation from 1948 to 2007. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **45** (1), 137–151, EDN: LLXFSB, https://doi.org/10.1134/S0001433809010095

27. Golubeva, E. and G. Platov, 2007: On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, **112** (4), C04S05, EDN: KODDKA, https://doi.org/10.1029/2006JC003734
28. Gradova, M. and E. Golubeva, 2023: Evaluation of the Riverine Heat Influx Impact on the Arctic Ice Cover Based on Numerical Modeling. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, **48**, 639–644, EDN: VGKAFQ, https://doi.org/10.3103/S1068373923070117
29. Halsband, C. and D. Herzke, 2019: Plastic litter in the European Arctic: What do we know? *Emerging Contaminants*, **5**, 308–318, EDN: QFWTYC, https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.11.001
30. Herzke, D., P. Ghaffari, J. H. Sundet, C. A. Tranang, and C. Halsband, 2021: Microplastic Fiber Emissions From Wastewater Effluents: Abundance, Transport Behavior and Exposure Risk for Biota in an Arctic Fjord. *Front. Environ. Sci.*, **9**, 662168, EDN: IDSSAF, https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.662168
31. Hunke, E. C. and J. K. Dukowicz, 1997: An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, **27** (9), 1849–1867, https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027%3C1849:AEVPMF%3E2.0.CO;2
32. Huserbråten, M. B. O., T. Hattermann, C. Broms, and J. Albretsen, 2022: Trans-polar drift-pathways of riverine European microplastic. *Sci. Rep.*, **12**, 3016, EDN: FMTOTM, https://doi.org/10.1038/s41598-022-07080-z
33. Ikenoue T., R. Nakajima, P. Mishra, E. V. Ramasamy, A. Fujiwara, S. Nishino, A. Murata, E. Watanabe, and M. Itoh, 2023: Floating microplastic inventories in the southern Beaufort Sea, Arctic Ocean. *Front. Mar. Sci.*, **10**, 1288301, EDN: ULVTKR, https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1288301
34. Jambeck, J. R., R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, and K. L. Law, 2015: Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, **347** (6223), 768–771, https://doi.org/10.1126/science.1260352
35. Kaiser, D., N. Kowalski, and J. J. Waniek, 2017: Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics. *Environ. Res. Lett.*, **12** (12), 124003, EDN: VDIYEE, https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8e8b
36. Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, J. Roy, and J. Dennis, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77** (3), 437–470, EDN: SNBWXR, https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2
37. Khatmullina, L. and I. Isachenko, 2017: Settling velocity of microplastic particles of regular shapes. *Marine Pollution Bulletin*, **114** (2), 871–880, EDN: EYBLMI, http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.024
38. Komar, P. D., 1980: Settling Velocities of Circular Cylinders at Low Reynolds Numbers. *J. Geol.*, **88** (3), 327–336, https://doi.org/10.1086/628510
39. Kooi, M., E. H. van Nes, M. Scheffer, and A. A. Koelmans, 2017: Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics. *Environ. Sci. Technol.*, **51** (14), 7963–7971, https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04702
40. Kvale, K. F., A. E. Friederike Prowe, and A. Oschlies, 2020: A Critical Examination of the Role of Marine Snow and Zooplankton Fecal Pellets in Removing Ocean Surface Microplastic. *Front. Mar. Sci.*, **6**, 808, EDN: SPACZF, https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00808
41. Lebreton, L. C.-M., S. D. Greer, and J. C. Borrero, 2012: Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Marine Pollution Bulletin*, **64** (3), 653–661, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.027
42. Lipscomb, W. H. and E. C. Hunke, 2004: Modeling Sea Ice Transport Using Incremental Remapping. *Mon. Weather Rev.*, **132** (6), 1341–1354, https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132%3C1341:MSITUI%3E2.0.CO;2

43. Lobelle, D., M. Kooi, A. A. Koelmans, C. Laufkötter, C. E. Jongedijk, C. Kehl, and E. van Sebille, 2021: Global Modeled Sinking Characteristics of Biofouled Microplastic. *J. Geophys. Res. Ocean*, **126** (4), e2020JC017098, EDN: WNKPCT, https://doi.org/10.1029/2020JC017098
44. López-Sandoval, D. C., T. Rodríguez-Ramos, P. Cermeño, C. Sobrino and E. Marañón, 2014: Photosynthesis and respiration in marine phytoplankton: Relationship with cell size, taxonomic affiliation, and growth phase. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **457**, 151–159, https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.04.013
45. Lusher, A. L., V. Tirelli, I. O'Connor, and R. Officer, 2015: Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Sci. Rep.*, 2015, **5**, 14947, EDN: VELTPJ, https://doi.org/10.1038/srep14947
46. Martyanov, S. D., A. V. Isaev, and V. A. Ryabchenko, 2023: Model estimates of microplastic potential contamination pattern of the eastern Gulf of Finland in 2018. *Oceanology*, **65**, 86–99, EDN: MVMVLQ, https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.11.006
47. Mato, Y., T. Isobe, H. Takada, H. Kanehiro, C. Ohtake, and T. Kaminuma, 2001: Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. *Environmental Science & Technology*, **35**, (2), 318–324, https://doi.org/10.1021/es0010498
48. Mountford, A. S. and M. A. Morales Maqueda, 2019: Eulerian Modeling of the Three-Dimensional Distribution of Seven Popular Microplastic Types in the Global Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **124** (12), 8558–8573, EDN: UCCNST, https://doi.org/10.1029/2019JC015050
49. Mountford, A. S. and M. A. Morales Maqueda, 2021: Modeling the accumulation and transport of microplastics by sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **126** (2), e2020JC016826, EDN: IZIYTB, https://doi.org/10.1029/2020JC016826
50. Mu, J., S. Zhang, L. Qu, F. Jin, C. Fang, X. Ma, W. Zhang, and J. Wang, 2019: Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea. *Marine Pollut. Bull.*, **143**, 58–65, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.023
51. Murawski, J., J. She, and V. Frishfelds, 2022: Modeling drift and fate of microplastics in the Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.*, **9**, 886295, EDN: GVKZFM, https://doi.org/10.3389/fmars.2022.886295
52. Obbard, R. W., S. Sadri, Y. Q. Wong, A. A. Khitun, I. Baker, and R. C. Thompson, 2014: Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, **2** (6), 315–320, https://doi.org/10.1002/2014EF000240
53. Osinski, R. D., K. Enders, U. Gräwe, K. Klingbeil, and H. Radtke, 2020: Model uncertainties of a storm and their influence on microplastics and sediment transport in the Baltic Sea. *Ocean Sci. Discuss.*, **16** (6), 1491–1507, EDN: APJEQI, https://doi.org/10.5194/os-16-1491-2020
54. Peeken, I., S. Primpke, B. Beyer, J. Gütermann, C. Katlein, T. Krumpen, M. Bergmann, L. Hehemann, and G. Gerdts, 2018: Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Communications*, **9**, 1505, EDN: YGWQTZ, https://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5
55. Proshutinsky, A., R. Krishfield, J. M. Toole, M.-L. Timmermans, W. Williams, S. Zimmermann, M. Yamamoto-Kawai, T. W. K. Armitage, D. Dukhovskoy, E. Golubeva, G. E. Manucharyan, G. Platov, E. Watanabe, T. Kikuchi, S. Nishino, M. Itoh, S.-H. Kang, K.-H. Cho, K. Tateyama, and J. Zhao, 2019: Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018. *JGR Ocean*, **124**, 9658–9689, EDN: ZYMMLK, https://doi.org/10.1029/2019JC015281
56. Rey, A., M. Ghazizadeh, and A. Pilechi, 2026: Microplastic Pathways in the Arctic: Integrating the TELEMAC-3D Hydrodynamic Model with Advanced Ray Tracing Particle Tracking. In: Coelho, C., Hallin, C., Sancho, F., Silva, P. A. (eds) *Coastal Dynamics* 2025. CD 2025. Coastal Research Library, vol 42. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-032-15477-4_44
57. Ross, P. S., S. Chastain, E. Vassilenko, A. Etemadifar, S. Zimmermann, S.-A. Quesnel, J. Eert, E. Solomon, S. Patankar, A. M. Posacka, and B. Williams, 2021: Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic inputs. *Nat. Commun.*, **12**, 106, EDN: VHPDJL, https://doi.org/10.1038/s41467-020-20347-1

58. Schernewski, G., H. Radtke, R. Hauk, C. Baresel, M. Olshammar, R. Osinski, and S. Oberbeckmann, 2020: Transport and Behavior of Microplastics Emissions From Urban Sources in the Baltic Sea. *Front. Environ. Sci.*, **8**, 579361, EDN: DHSGMP, https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579361
59. Teuten, E. L., J. M. Saquing, D. R. Knappe, M. A. Barlaz, S. Jonsson, A. Björn, S. J. Rowland, R. C. Thompson, T. S. Galloway, R. Yamashita, D. Ochi, Y. Watanuki, C. Moore, P. H. Viet, T. S. Tana, M. Prudente, R. Boonyatumanond, M. P. Zakaria, K. Akkhavong, Y. Ogata, H. Hirai, S. Iwasa, K. Mizukawa, Y. Hagino, A. Imamura, M. Saha, and H. Takada, 2009: Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol Sci.*, **364** (1526), 2027–2045, EDN: MLOSGX, https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284
60. Tošić, T. N., M. Vruggink, and A. Vesman, 2020: Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas. *Mar. Pollut. Bull.*, **161**, 111745, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111745
61. Van Sebille, E., M. H. England, and G. Froyland, 2012: Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.*, **7** (4), 044040, https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040
62. Wright, S. L., R. C. Thompson, and T. S. Galloway, 2013: The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, **178**, 483–492, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031
63. Yakushev, E., A. Gebruk, A. Osadchiev, S. Pakhomova, A. Lusher, A. Berezina, B. van Bavel, E. Vorozheikina, D. Chernykh, G. Kolbasova, I. Razgon, and I. Semiletov, 2021: Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers. *Commun. Earth Environ.*, **2**, 23, EDN: FNNWSG, https://doi.org/10.1038/s43247-021-00091-0

Submitted 15.05.2026, accepted 25.08.2026.
**For citation:** Gradova, M. A. and E. N. Golubeva, 2026: Numerical modeling of microplastic transport in arctic waters. *Journal of Oceanological Research*, **54** (3), 147–172, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).8

## 北极水域微塑料输运的数值模拟

**M. A. Gradova, E. N. Golubeva**

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,*
*6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk,* 邮编：*630090, Russia,*
电子邮件：*gradova.ma.22@gmail.com*

本文采用三维数值模拟方法分析北冰洋水域微塑料的输运，并确定颗粒可能聚集的区域。数值模拟是环境监测之外研究水体环境污染问题的有效科学工具。该数值模型能够计算取决于季节性变化环境状况（即海流与海冰漂移的方向和速度、海洋温盐状态、微塑料表面生物膜积累与降解过程的强度）的拉格朗日输运轨迹。本研究分析了来自太平洋和大西洋的漂浮微塑料在北极水域的传播特征。研究表明，在极地水域，移动冰盖的存在显著影响塑料颗粒的运动轨迹，而生物污损过程则更多地决定漂浮颗粒的下沉深度。数值实验结果还表明，根据水循环与海冰漂移系统，加拿大海盆的反气旋环流、楚科奇海大陆坡和巴伦支海是北冰洋微塑料的潜在聚集区。

**关键词：** 微塑料，海洋污染，北冰洋，数值模拟，拉格朗日输运，微塑料生物污损

**致谢：** 本研究由俄罗斯科学基金会资助（项目编号：25-21-00585）。数值计算在俄罗斯科学院西伯利亚分院西伯利亚超级计算机中心共享平台完成。作者感谢匿名审稿人提出的建设性意见。