

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*



**Жданов Игорь Андреевич**

**ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО  
МИКРОПЛАСТИКА В ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКЕ НА ОСНОВЕ  
УНИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

Автореферат на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук

**Якушев Евгений Владимирович**

Официальные оппоненты: **Люлин Сергей Владимирович**

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий Лабораторией теории и моделирования полимерных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института высокомолекулярных соединений Российской академии наук

**Поздняков Шамиль Рауфович**

доктор географических наук, директор Института исследований континентальных водных объектов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_ час. \_\_ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук Соловьев Дмитрий Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Загрязнение частицами микропластика различных природных объектов является сравнительно новым направлением в науке и привлекает к себе значительное внимание различных научных групп. Частицы микропластика – пластиковые частицы с размерами до 5 мм [Чубаренко et al., 2021]. При этом за нижнюю границу размера частиц различными исследователями предлагаются величины в диапазоне от 1 до 100 мкм, однозначной договоренности на данный момент достичь не удалось. Присутствие микропластика зафиксировано во всех естественных матрицах [Xiao Zhi, 2021]. Он обнаружен в питьевой воде [Welle and Franz, 2018] и даже в крови человека [Leslie et al., 2022], но вопрос о вреде подобных частиц для организма человека и окружающей среды остается дискуссионным и активно изучается в настоящее время.

Микропластик в Мировом океане находят повсеместно, даже в довольно удаленных участках планеты с минимальным антропогенным воздействием (например, на дне Марианской впадины [Flierdt et al., 2004]), но данных о микропластике в океане недостаточно. Особенно остро это ощущается в Арктическом регионе, который является зоной накопления многих загрязнителей [Rudnicka-Kępa and Zaborska, 2021]. На данный момент данные о загрязнении Арктики ограничены единичными работами [Bergmann 2021]. Сложившуюся ситуацию осложняет применение разных методов проведения исследований, что ведет к невозможности сравнения данных между собой [Li, Liu, and Paul Chen, 2018]. Поэтому проведение исследований в Арктике едиными унифицированными методами является одной из актуальных задач.

Количественные данные о распределении микропластика необходимы, чтобы понимать его поведение в окружающей среде, оценивать источники загрязнения, прогнозировать его распространение и зоны накопления, а также рассчитывать баланс пластика в океане. В работе [Van Sebille, England, and

Froyland, 2012] описываются результаты модельных исследований, в которых частицы пластика представлены как пассивный трассер, в результате чего был сделан прогноз о возможности аккумуляции микропластика в Баренцевом море и создании там шестого «мусорного пятна». Для уточнения полученных выводов, подобные модельные исследования должны подтверждаться натурными измерениями. Совокупность этих фактов говорит о том, что исследования микропластикового загрязнения в Арктике актуально и его необходимо проводить в рамках унифицированных и надежных методов.

**Целью** настоящей работы является оценка уровня загрязнения микропластиком поверхностных вод Евразийской Арктики оптимизированными методами и исследование его пространственной и временной изменчивости.

В рамках указанной цели были решены **задачи работы:**

1. Изучить и оптимизировать современные методики пробоотбора и анализа микропластика в водной матрице.
  - Гармонизировать и оптимизировать применяемые методы отбора и анализа микропластика с учетом рекомендаций международных научных групп (AMAP, GESAMP).
  - Разработать метод идентификации частиц в полевых условиях, включая создание библиотеки спектров для портативного ИК-спектрометра ближней области.
2. С помощью оптимизированных методов отобрать и проанализировать пробы поверхностного слоя вод для оценки качественного и количественного уровня загрязнения частицами плавающего микропластика:
  - В Арктических реках (на примере р. Северная Двина);
  - В плюмах Великих Сибирских рек;
  - В Арктических морях на примере Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей.

3. Исследовать пространственную и временную изменчивость содержания плавающего микропластика в Евразийской части Арктики.
4. Проанализировать степень загрязнения микропластиком Евразийской Арктики по сравнению с другими районами Мирового океана.
5. Определить потенциальные источники загрязнения микропластиком Евразийской Арктики.

**Методология и методы научного исследования.** Для оценки степени загрязнения поверхностного слоя акваторий Евразийской Арктики применялись оптимизированные методики отбора и анализа проб, основанные на рекомендациях международных научных групп (АМАР). В качестве устройства лова выбрана нейстонная сеть с размером ячеей в 330 мкм. В данной работе минимальный размер изучаемых частиц составил 0,5 мм, что является принятой нижней границей для применяемого метода извлечения частиц. Текстильные волокна не учитывались, так как данный метод не гарантирует корректного отбора всех волокон с размерами до 0,5 мм. Во время всего цикла работ контролировалось загрязнение проб частицами из окружающей среды. Для оценки контроля качества анализа был применен тест на степень извлечения частиц из природной матрицы с последующей идентификацией частиц, который подтвердил применимость и точность выбранного метода обработки и анализа проб. Идентифицировались 100% обнаруженных потенциальных пластиковых частиц с применением ИК-спектроскопии с Фурье преобразованием. Данный метод является наиболее часто применимым в современных исследованиях, что дает возможность сравнения с данными международных групп. Помимо этого, полный анализ всех частиц позволяет получать достоверные концентрации микропластика и более корректно оценивать степень загрязнения изучаемого объекта. В рамках исследования, кроме численных концентраций, также были определены массовые концентрации путем прямого взвешивания (точность взвешивания до 0.00001 г) или путем расчета массы частиц через плотность полимера и объем частицы.

В ходе работы была разработана методика идентификации морского мусора размерами до 1 мм с использованием портативного ИК-спектрометра ближней области MicroNIR. Для этого была создана библиотека эталонных спектров наиболее часто встречающихся в морской среде полимеров. Результаты тестов показывают, что метод подходит для идентификации пластикового морского мусора, за исключением полностью черных фрагментов и частиц размерами ниже 1 мм (корректность идентификации проверялась на ИК-спектрометре с Фурье преобразованием). Данная методика применялась для анализа образцов в рейсах, данные которых представлены в этой работе.

**Научная новизна** заключается в том, что впервые получены данные о загрязнении частицами микропластика поверхности Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского морей с использованием оптимизированных и унифицированных методик. Проведено сравнение полученных данных с данными других районов Мирового океана, полученных и обработанных едиными методами. Впервые проведена оценка уровня загрязнения поверхностного слоя реки Северная Двина и исследована сезонная изменчивость количественных характеристик микропластика и выноса микропластика в открытое море. Описана картина пространственного распределения микропластика и макромусора на поверхности моря в Евразийской части Арктики. Проведена оценка межгодовой изменчивости в осенний период, а также потенциальных источников микропластикового загрязнения в Карском море. Разработана методика экспресс-анализа морского пластикового мусора на базе портативного спектрометра ближней ИК области MicroNIR.

**Личный вклад автора.** Автор участвовал в 4 научно-исследовательских экспедициях в Северный Ледовитый океан, где лично отбирал пробы, обрабатывал их, подготавливал к анализу. Автор принимал участие в идентификации отобранных частиц с помощью ИК-спектроскопии, подготавливал стандартные материалы для создания библиотек в методике

идентификации морского мусора. Обработывал и анализировал пробы для реки Северная Двина, участвовал в обработке данных. С коллективом соавторов обеспечивал подготовку полученных данных к публикациям в ведущих научных журналах, участвовал в написании статей и представлял полученные результаты на конференциях в России и за рубежом.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Предложенные в работе меры по оптимизации методов исследования микропластика будут учтены в последующих международных рекомендациях по гармонизации и стандартизации методов исследования микропластика в природных водах. Разработанная методика определения морского мусора портативным спектрометром ближней ИК-области MicroNIR позволяет исследователям проводить качественный анализ мусора в полевых условиях с меньшими затратами на оборудование и уже используется в нескольких международных проектах. Полученные данные о концентрации, пространственном распределении и межгодовой изменчивости микропластика углубляют имеющиеся знания о распространении микропластика на поверхности океана в целом и в бассейне Евразийской Арктики в частности. Наблюдаемая картина распределения микропластика демонстрирует необходимость учета распространения речных плумов Великих сибирских рек в связи с заметным влиянием речного стока на поступление и перераспределение частиц микропластика по поверхности. Полученные количественные характеристики в дальнейшем могут быть использованы в математических моделях распространения микропластика в океане и способны внести важные уточнения в модели, посвященные транспорту пластиковых частиц в Арктике.

В результате исследований сформулированы следующие **основные положения**, выносимые на защиту:

1. Оптимизированы методы проботбора и анализа частиц микропластика в поверхностном слое вод. Разработана методика идентификации частиц с помощью портативного ИК-спектрометра ближней области MicroNIR.

2. Впервые получен массив данных, собранных едиными оптимизированными методами о качественном и количественном содержании плавающего микропластика (численная концентрация, массовая концентрация, тип полимера, размер, цвет, морфология) в морях Евразийской Арктики, в осенне-летний период 2019–2022 гг. и в реке Северная Двина в безледный период в 2019–2021 гг.
3. Установлено, что содержание плавающего микропластика в Евразийской части Северного Ледовитого океана ( $0.01$  штук/ $m^3$ ) ниже, чем в Мировом океане ( $2.5$  штук/ $m^3$ ). Уровень микропластикового загрязнения в Евразийской части Северного Ледовитого океана уменьшается с запада на восток. Наибольшее содержание плавающего микропластика наблюдается в юго-восточной части Баренцева моря и юго-западной части Карского моря (Карские ворота –  $0.93$  штук/ $m^3$ ), наименьшее – в море Лаптевых и Восточно-Сибирском морях ( $0.005$  штук/ $m^3$ ).
4. Впервые показано, что уровень загрязнения микропластиком реки Северная Двина ниже других европейских рек ( $0-0.005$  штук/ $m^3$ ). Обнаружено, что содержание микропластика в плюмах рек Обь, Енисей, Лена ( $0.006$  штук/ $m^3$ ) ниже, чем в окружающих высокосоленых водах ( $0.016$  штук/ $m^3$ ), частицы микропластика в плюмах и в высокосоленых водах отличаются морфологией, размерами и типом полимеров. В Евразийской Арктике реки не являются основным источником поступления микропластика в океан, в отличие от других регионов Мирового океана.
5. Впервые исследована межгодовая изменчивость распределения микропластика в поверхностном слое Карского моря в осенне-летний период 2019–2022 гг., четких тенденций в изменениях содержания плавающего микропластика не обнаружено. Установлено, что основное поступление плавающего микропластика осуществляется из Баренцева моря.



**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных данных обеспечивается использованием методик, применяемых в настоящее время в мировой практике при отборе и обработке проб на содержание микропластика, а также использование методов ИК-спектроскопии для идентификации всех потенциальных пластиковых частиц. Полученные результаты сопоставимы с данными, публикуемыми ранее о данном регионе. В рамках работы были проведены эксперименты по контролю степени извлечения микропластика для применяемых методик, которые показали хорошие результаты. Определенной гарантией достоверности и новизны научных результатов работы является их публикация в ведущих рецензируемых журналах.

**Апробация результатов.** Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на заседаниях Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (июнь 2022 г.), на круглых столах в рамках консорциума «Микропластик в окружающей среде» и VI Всероссийской конференции с международным участием «Гидрометеорология и экология. Достижения и перспективы развития 2022» имени Л.Н. Карлина (декабрь 2022), на конференциях: Комплексные исследования мирового океана 2021 (ноябрь 2021), Школе морской геологии 2021 (апрель 2022), на ассамблее Европейского геофизического союза (EGU-2021, 2022), Arctic Science Summit Week 2021, MICRO 2022, 7th International Marine Debris Conference (7IMDC) (2022), Arctic Frontiers Science – 2023 (январь 2023), Комплексные исследования мирового океана 2023 (май 2023).

**Публикации по теме диссертации.** Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. Всего опубликовано 10 научных работ по теме диссертации, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и 5 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных литературных источников. Объем работы составляет 118 страниц, включая 43 рисунка и 16 таблиц. Библиографический список включает в себя 140 наименования, в том числе 132 на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор благодарит главного научного сотрудника Лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов ИО РАН, доктора физико-математических наук Якушева Евгения Владимировича за всестороннюю помощь, поддержку и ценные советы по написанию диссертации и вдохновение заниматься наукой. Автор выражает глубокую признательность кандидату геолого-минералогических наук Пахомовой Светлане Владимировне за всестороннюю помощь в написании диссертации, за научные идеи, помощь в освоении методов анализа и интерпретации результатов, помощь и поддержку. Автор выражает благодарность научному сотруднику Атлантического отделения ИО РАН, доктору физико-математических наук Чубаренко Ирине Петровне за ценные предложения и замечания по работе. Автор также благодарит коллектив сотрудников ИО РАН: Березину Анфису Владимировну за консультации по интерпретации данных и их помощь в их визуализации, доктора физико-математических наук Осадчиева Александра Александровича за консультации по особенностям распространения речных плюмов в СЛО и пример успешного молодого ученого, кандидата географических наук Погожеву Марию Петровну за помощь в экспедиционной работе. Автор также благодарит студентку кафедры океанологии МГУ им. М.В. Ломоносова Поливанову Татьяну Константиновну за помощь в экспедиционных работах и в обработке данных.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, включающая: обоснование актуальности темы, основную цель исследования, поставленные

задачи, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, научную и практическую значимость, личный вклад автора и апробацию результатов исследования.

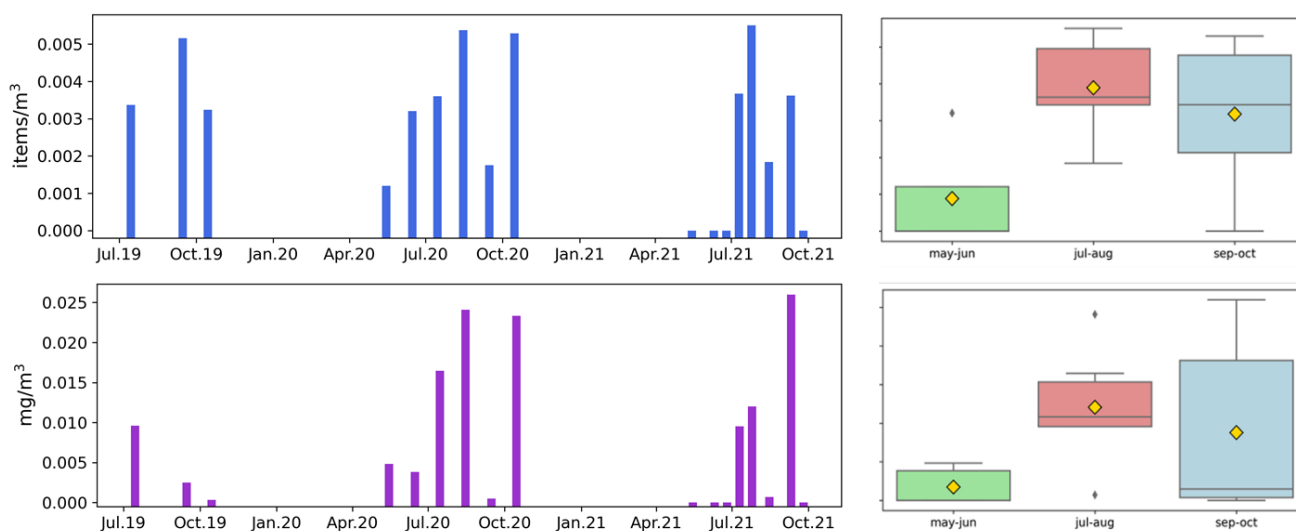
В **Главе 1** выполнен обзор актуального состояния исследований по проблеме загрязнения микропластиком Арктического региона, в частности, Северного Ледовитого океана. В **разделе 1.1** приводится описание основных понятий и терминов микропластикового загрязнения. Описаны основные свойства частиц микропластика, которыми они характеризуются: тип полимера, размеры, морфология, цвет, численные и массовые концентрации. **Раздел 1.2** посвящен физико-географическому описанию объекта исследования, а именно Евразийской Арктики. Материалы **раздела 1.3** посвящены обзору современных исследований микропластикового загрязнения Арктики другими научными группами. Исследования проводились в различных районах и в разное время (Центральный Арктический бассейн; воды, омывающие архипелаг Шпицберген; сибирский шельф), применялись различные устройства отбора проб. В совокупности эти факторы не позволяют проводить полноценный анализ пространственной и временной изменчивости концентраций микропластика в акватории Северного Ледовитого океана. Отмечается, что необходимы данные, отобранные едиными гармонизированными методами для описания региона с точки зрения динамики содержания микропластика в Арктическом регионе. Несмотря на ограниченное количество доступных данных, можно выделить некоторые основные закономерности: Арктика на данном этапе загрязнена сравнительно слабо, максимальные концентрации найдены во льду, на распределение частиц в поверхностном слое оказывает значительное влияние движение водных масс и береговой сток. В **разделе 1.4** кратко сформулированы основные выводы по первой главе.

В **Главе 2** приведено описание методик пробоотбора и анализа проб. В **разделе 2.1** различные методики, используемые в работе международными научными коллективами, охарактеризованы с точки зрения применимости в различных акваториях (морских и пресноводных), минимального размера

определяемых частиц, возможности внешнего загрязнения. Особое внимание уделяется методам отбора проб с поверхностного слоя, рекомендованным международными комиссиями по мониторингу микропластикового загрязнения. В разделе 2.2 описаны процедуры по обеспечению и контролю качества исследования микропластикового загрязнения водных объектов. В следующей части раздела определены современные методы анализа идентификации частиц микропластика, наиболее достоверными и применимыми из которых являются методы ИК-спектроскопии. Раздел 2.3 посвящен описанию разработки методики идентификации морского мусора с минимальным размером до 1 мм с помощью портативного ИК-спектрометра ближней области MicroNIR. Представленный метод идентификации – экспрессный, простой сравнительно недорогой, его можно использовать в полевых условиях. Для корректной идентификации типа полимера была создана библиотека эталонных спектров на основе наиболее распространенных полимеров. В дальнейшем она была дополнена спектрами бытовых пластиковых объектов с известным составом. Для упрощения определения частиц из природной среды были добавлены спектры хлопка и древесины. Созданный метод в качестве теста применялся к потенциальным пластиковым фрагментам разного размера, морфологии и цвета из природной среды (морская вода и пляжи) и успешно идентифицировал все частицы, за исключением полностью черных и частиц меньше 1 мм. Раздел 2.4 посвящен применяемым в данной работе методам отбора и анализа проб из поверхностного слоя. Приведены результаты теста на степень извлечения частиц из пробы, который подтверждает адекватность и корректность выбранной методики пробоподготовки. Данный тест рекомендован к проведению в последующих исследованиях. В качестве модернизации методов анализа, также рекомендовано проводить оценку массовой концентрации. Приводится обоснование выбора методик пробоотбора и анализа, которые использовались в данной работе: отбор проб нейстонной сетью с последующей идентификацией частиц при помощи ИК-спектроскопии с Фурье преобразованием.

В третьей главе приведены результаты мониторинговых работ в реке Северная Двина, выполненных для оценки межгодовой и межсезонной изменчивости поступления микропластика в открытое море. В разделе 3.1 дается оценка роли рек как потенциальному источнику загрязнения морей и отмечается низкая степень изученности пресноводных систем. В разделе 3.2 охарактеризованы некоторые гидрологические особенности устья реки Северная Двина, а также особенности района работ и прилегающих территорий. Раздел 3.3 посвящен результатам и обсуждениям результатов. Полученные концентрации микропластика колеблются в пределах 0–0.005 штук/м<sup>3</sup> или 0–0.025 мг/м<sup>3</sup> в зависимости от сезона (рисунок 1). Более низкие концентрации наблюдались в период паводка в мае-июне и были максимальны в июле-августе. Данные результаты, по-видимому, объясняются большей активностью судоходства и туризма в регионе, начиная с июля месяца.

Обнаружены основные типа морфологии частиц микропластика. Самым распространенным типом были фрагменты. Большинство частиц было идентифицировано как полиэтилен (ПЭ) 59%, затем полипропилен (ПП) 29%. Если смотреть на качественный состав всех найденных частиц, включая макропластик, то лидируют также ПЭ (59%), затем ПП (45%).



**Рисунок 1** — Наблюдаемая изменчивость по месяцам и сезонам численной концентрации (сверху) и массовой концентрации (внизу) микропластика в Северной Двине в 2019–2021 гг.

На основе полученных концентраций и величины стока реки был рассчитан вынос микропластика в открытое море. В среднем вынос находится на одном уровне и заметно не изменяется со сменой сезона, так как уровень концентрации микропластика и величина стока реки изменяются в противофазе.

Средняя концентрация микропластика за исследованный период составила  $0.003$  штук/м<sup>3</sup> или  $7.5$  мг/м<sup>3</sup>. Данные концентрации говорят о Северной Двине как об источнике поступления загрязнителя в Белое и Баренцево моря, но не как о доминирующем. В то же время Северная Двина может выступать в качестве источника загрязнения вторичным микропластиком из-за наличия в пробах мезо- и макрочастиц, которые практически не обнаружены в сопряженных с рекой морях. Сезонные колебания выноса регулируются в основном за счет изменчивости расхода воды. Сравнение с другими реками позволяет сделать вывод, что Северная Двина менее загрязнена микропластиком (на 1–2 порядка), чем другие реки с антропогенной нагрузкой.

**Глава 4** посвящена пространственному распределению поверхностного микропластика в Евразийской Арктике. Здесь приведены натурные данные, полученные в арктических научно-исследовательских экспедициях (таблица 1).

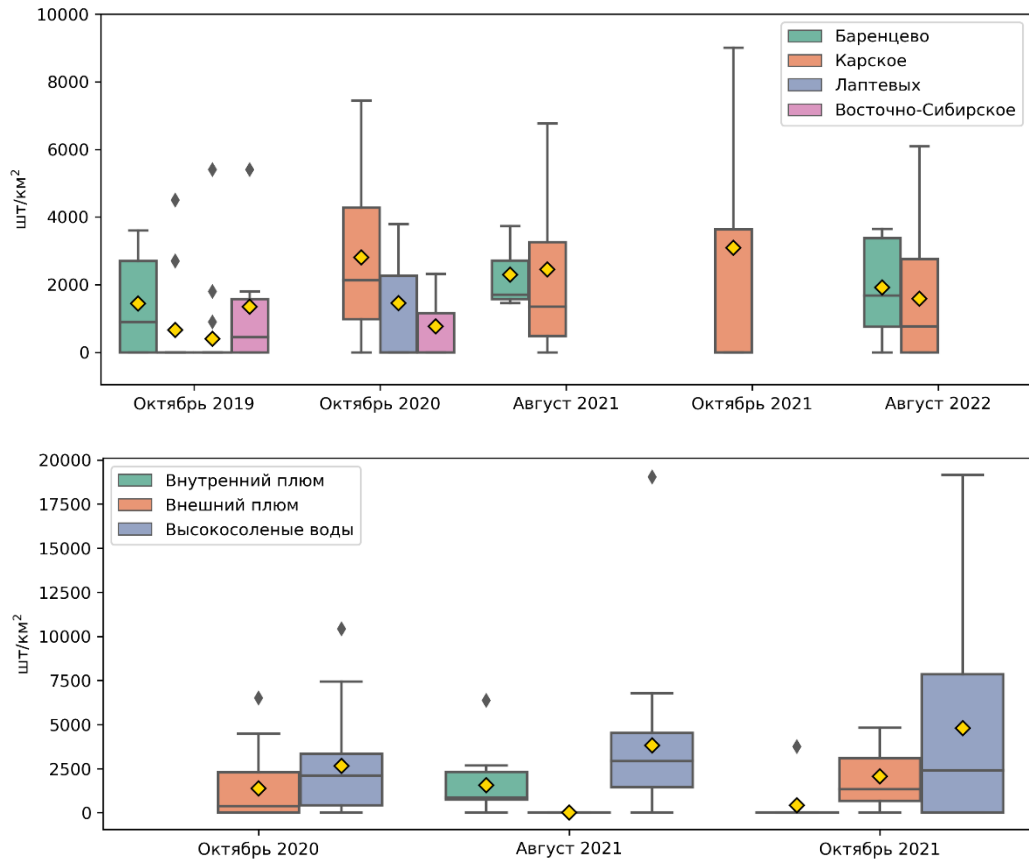
**Раздел 4.1** посвящен описанию пространственного распределения микропластика в исследуемой акватории. Исследования проводились в осенне-летний период в 2019–2022 гг. (рисунок 2) в рамках рейсов: 78 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (октябрь 2019г.) в Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское моря, 48 станций; 82 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (октябрь 2020г.) в Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское моря, 40 станций; 86 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (октябрь 2021г.) в Баренцево, Карское моря, 28 станций; 89-1 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 2022г.) в Баренцево, Карское моря, 28 станций; 58 рейс НИС «Академик Иоффе» (август 2021г.) в Баренцево, Карское моря, 40 станций.

Таблица 1 Средние концентрации микропластика за разные периоды наблюдений

Даты экспедиций	окт.19	окт.20	авг.21	окт.21	сен.22	Все экспедиции
Акватории	Средняя концентрация, штук/м <sup>3</sup> (штук/км <sup>2</sup> )/ мкг/м <sup>3</sup>					
Всего	<b>0.004 (800)/ 3.7</b>	<b>0.01 (2010)/ 10.5</b>	<b>0.012 (2440)/ 15.3</b>	<b>0.015 (3100)/ 20.4</b>	<b>0.008 (1680)/ 3.6</b>	<b>0.01 (2010)/ 10.7</b>
Баренцево море	0.005 (1030) / 12.5	-	0.011 (2300) / 36.0	-	0.01 (1900) / 7.6	0.009 (1730) /18.7
Карские ворота			-			0.933 (186700) / 640
Карское море	0.003 (660) / 3.8	0.014 (2800) /16.2	0.012 (2450) / 13.6	0.015 (3100) / 20.4	0.007 (1600) / 2.0	0.01 (2100) / 11.2
Море Лаптевых	0.002 (400) / 0.5	0.007 (1450) / 6.7	-	-	-	0.0046 (900) / 3.6
Восточно-Сибирское море	0.007 (1350) / 3.2	0.004 (770) / 0.82	-	-	-	0.0055 (1060) / 2.0
<b>Баренцево и Карское моря</b>						
Внутренний плюм	-	-	0.008 (1560) / 14.5	0.002 (400) / 7.9	-	0.005 (1000) / 11.2
Внешний плюм	0.0032 (640) / 4.5	0.009 (1720) / 7.8	-	0.01 (2050) / 23.8	-	0.007 (1470) / 12.0
Высокошальные воды	0.0045 (900) / 9.7	0.017 (3450) / 25.6	0.019 (3800) / 20.9	0.024 (4800) / 26.8	-	0.016 (3240) / 20.8



Рисунок 2 — Карта расположения станций в экспедициях 2019–2022 гг.

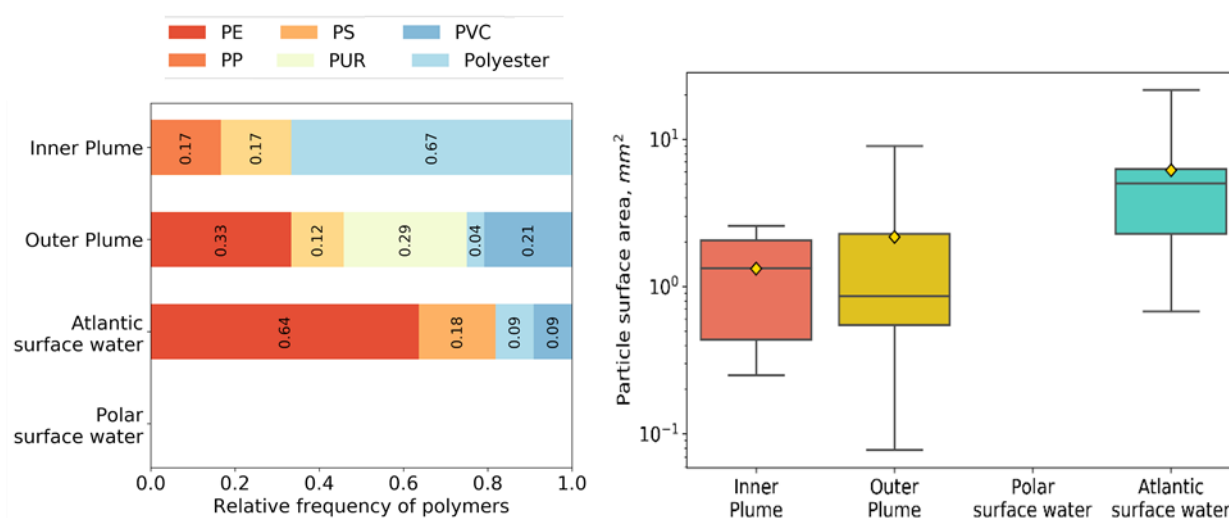


**Рисунок 3** — Средние концентрации в исследуемых морях и в водах разной солёности в период экспедиций

Как видно из таблицы 1 и диаграмм (рисунок 3), за период измерений прослеживается схожий характер распределения концентраций микропластика. Более высокие концентрации отмечены в Баренцевом и Карском морях (в среднем  $0.01$  штук/м<sup>3</sup>) с максимумом содержания в Карских воротах ( $0.9$  штук/м<sup>3</sup>). Море Лаптевых и Восточно-Сибирское море характеризовались более низкими концентрациями (в среднем  $0.005$  штук/м<sup>3</sup>). Четкая тенденция снижения концентрации микропластика с запада на восток видна на примере массовой концентрации:  $18.7 \rightarrow 11.2 \rightarrow 3.6 \rightarrow 2.0$  мг/м<sup>3</sup> от Баренцева моря до Восточно-Сибирского моря. Для всех годов исследования было найдено, что высокосолёные воды ( $> 28$  PSU) в 2-3 раза более загрязнены микропластиком, чем воды речных плюмов ( $< 28$  PSU) (таблица 1, рисунок 3). Полученные результаты говорят о том, что Великие Сибирские реки не являются основным источником микропластика в Евразийской Арктике.



Более подробно особенности распределения микропластика рассмотрим на примере 2019 г. Численные концентрации поверхностного микропластика варьировались от 0 до 0.027 штук/м<sup>3</sup> (0–5400 штук/км<sup>2</sup>), в среднем  $0.004 \pm 0.009$  штук/м<sup>3</sup> ( $800 \pm 2000$  штук/км<sup>2</sup>) в расчете на изучаемую акваторию. Было обнаружено, что характеристики микропластика в высокосолёных водах отличались от характеристик частиц, найденных в плюмовых водах (рисунок 4). Частицы микропластика с меньшими размерами (с площадью поверхности <3 мм<sup>2</sup>) преобладают во внутренних малосолёных водах, прилегающих к устьям и дельтам рек. Во внешнем плюме частицы микропластика имели большие размеры (с площадью поверхности до 10 мм<sup>2</sup>). Различие между средними концентрациями микропластика во внутреннем и внешнем плюмах были незначительными (0.0045 штук/м<sup>3</sup> и 0.0051 штук/м<sup>3</sup> соответственно), при этом была обнаружена заметная разница для массовых концентраций (1.6 мг/м<sup>3</sup> и 2.9 мг/м<sup>3</sup> соответственно). Микропластика не обнаружено в высокосолёных водах между речными плюмами Енисея и Лены. В 2019 г. в водах атлантического происхождения было такое же количество микропластика (0.0045 штук/м<sup>3</sup>), как и в речных плюмах. Однако площадь поверхности, типы полимеров, морфология и массовая концентрация значительно различались (рисунок 4).



**Рисунок 4** — Полимерный состав и площадь поверхности частиц микропластика, найденных в разных водах

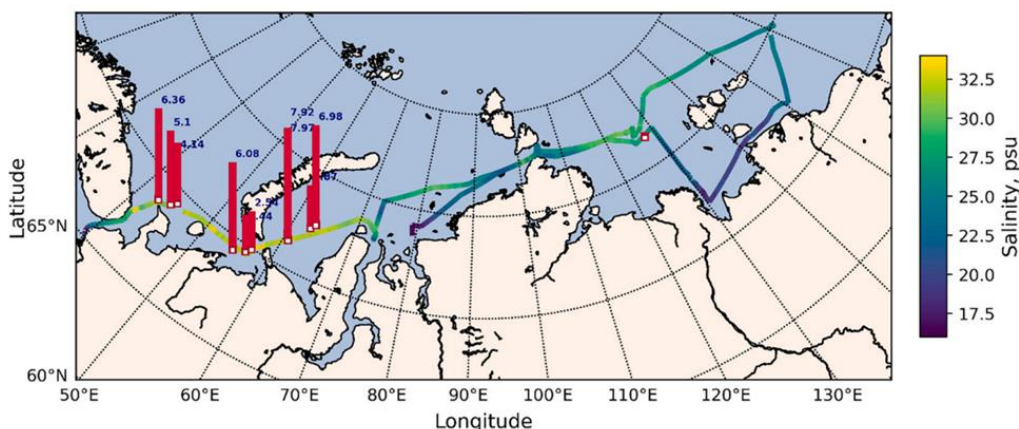
На основании этих результатов можно предположить два основных источника микропластика в Евразийской Арктике: перенос с поверхностными водами Атлантики и вынос с водами сибирских рек. Это также подтверждается отсутствием микропластика в Арктических поверхностных водах, которые не находятся под непосредственным влиянием этих источников.

В разделе 4.2 сравниваются концентрации в Евразийской Арктике с другими районами Мирового океана: Центральной Атлантикой и акваторией Охотского и Японского морей. Измеренные данные говорят о разнице в концентрациях поверхностного микропластика в несколько раз (таблица 2).

**Таблица 2** Сравнение данных Евразийской части Арктики, Атлантики и Тихого океана (данные получены автором лично в экспедициях).

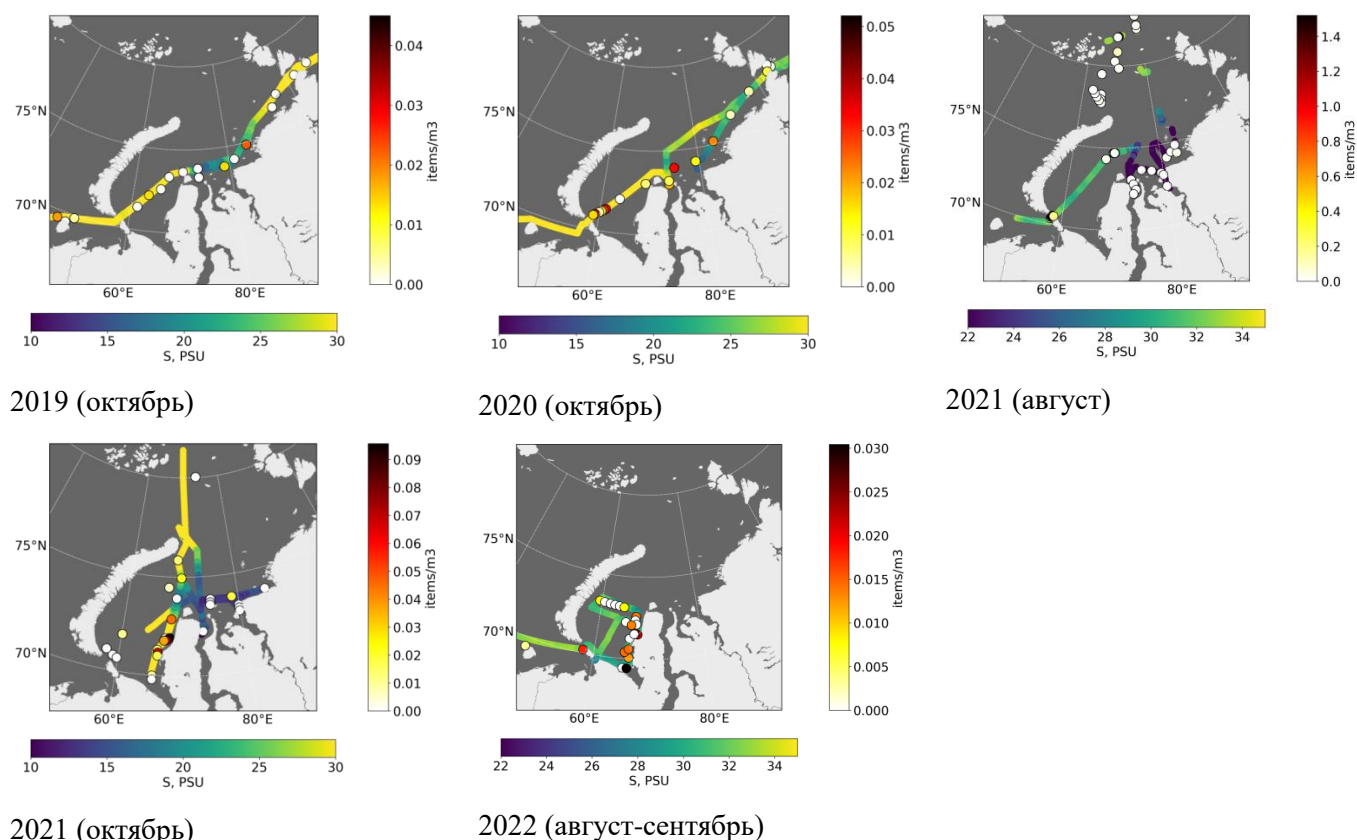
Район	Северный Ледовитый океан	Атлантический океан	Тихий океан
Границы численных концентраций, штук/м <sup>3</sup>	0–0.027	0–0.12	0–2.5
Средние численные концентрации, штук/м <sup>3</sup>	0.004	0.044	0.11

**Раздел 4.3** описывает пространственное распределение морского плавающего макромусора в акватории Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей (рисунок 5), которое совпадает с распределением микропластика. Это позволяет предположить, что в обоих случаях наблюдаются общие закономерности переноса частиц в Арктике. Концентрации макромусора на поверхности Евразийской Арктики схожим образом уменьшаются в направлении с запада на восток. В разделе 4.4 представлены основные выводы по Главе 4.

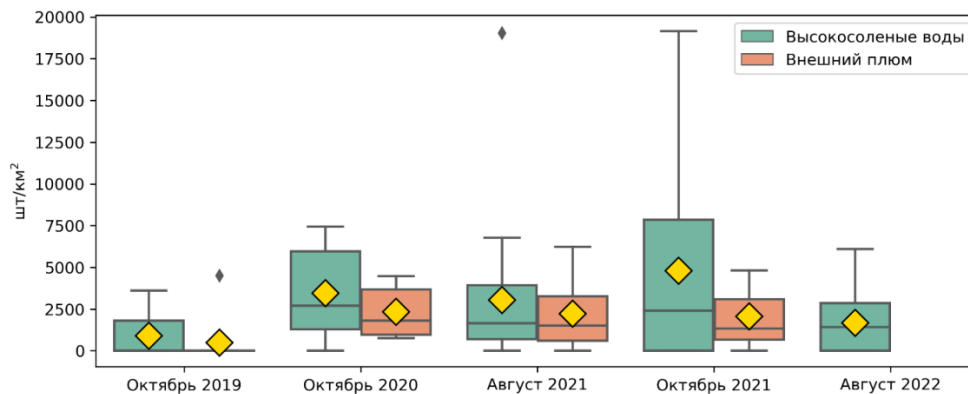


**Рисунок 5** — Карта распределения плавающего морского мусора (штук/км<sup>2</sup>) и солёности

**Глава 5** посвящена межгодовой изменчивости в Карском море в 2019–2022 гг. Рассматриваются гипотезы о потенциальных источниках микропластикового загрязнения, их временная изменчивость и возможное влияние на распределение микропластика. **Раздел 5.1** посвящен распределению микропластика в Карском море по данным проведенных экспедиций (рисунок б). В разные годы расположение и количество станций пробоотбора менялось, в частности, отличалось количество станций в опресненных и высокосоленных водах. Вместе с этим менялись гидрофизические условия: площадь распространения плуа Оби и Енисея, интенсивность проникновения баренцевоморских вод, площадь и продолжительность оледенения. Поэтому средние концентрации для акватории Карского моря не показательны – необходимо разделить исследуемый регион на опресненные и высокосоленные воды по аналогии с Главой 4. Здесь мы рассмотрели содержание микропластика в водах с соленостью  $> 28$  PSU и в водах внешнего плуа с соленостью  $16 < S < 28$ . Внутренний плум не рассматривался из-за недостатка данных.



**Рисунок 6** — Поверхностная соленость и количество микропластика (штук/м<sup>3</sup>) вдоль трека судна в выполненных рейсах в 2019–2022 гг.



**Рисунок 7** — Концентрации микропластика в водах внешнего плюма Оби и Енисея и в высокосолёных водах

Если рассматривать все полученные данные одновременно, то явного тренда в изменении концентраций микропластика не наблюдается (рисунок 7). Но если рассматривать данные только осенних экспедиций, заметен рост концентраций в высокосолёных водах. При этом в водах внешнего плюма концентрации остаются на том же уровне. Для более глубокого понимания природы наблюдаемых изменений в концентрациях и оценки достоверности этого роста необходимо проанализировать влияние потенциальных источников пластикового загрязнения в разные годы исследований. В **разделе 5.2** описано потенциальное влияние рек Обь, Енисей, Печора на динамику поверхностного микропластика в осенний период 2019–2022 гг. Для этого были проанализированы величины речного стока рек Обь, Енисей и Печера, а также зона распределения плюма Печеры. Полученные данные показали, что речные системы и плюмы рек способны влиять на перераспределение частиц поверхностного микропластика в Карском море, а также выполнять барьерные функции для поступления микропластика через проливы Карские ворота и Югорский Шар. При этом реки вносят свой вклад в количество микропластика, но не являются доминирующим фактором загрязнения изучаемой акватории.

**Раздел 5.3** посвящен анализу влияния ледовой обстановки и проникновения поверхностных баренцевоморских вод. Показано, что лед способен выполнять барьерную (за счет затруднения распространения более загрязненных баренцевоморских вод в Карское море) и накопительную

функцию (за счет вмерзания частиц) для частиц микропластика. Аномальное таяние льдов в Арктическом регионе в 2020 году, возможно, могло повлиять на увеличение концентраций в сравнение с 2019 годом. Высказывается гипотеза о морском льде как об источнике вторичного микропластика за счет увеличения скорости растрескивания вмерзающего пластика. В разделе 5.4 приведены основные выводы по Главе 5.

В **Заключении** сформулированы основные выводы исследования. В рамках выполненной работы впервые была проведена оценка пространственной и межгодовой изменчивости концентраций поверхностно микропластика в акватории Евразийской Арктики в осенне-летний период. Выбранный комплекс методов сбора и анализа проб микропластика был оптимизирован и применен для исследований в Арктике. Для оперативного анализа в полевых условиях была разработана методика идентификации потенциальных пластиковых фрагментов с помощью портативного ИК-спектрометра ближней области MicroNIR, которая демонстрирует свою применимость при работе с морским мусором. Данные, полученные в разные сезоны и годы, позволили впервые провести оценку межсезонной и межгодовой изменчивости как речных (Северная Двина) так и морских (Карское море) систем. Концентрация поверхностного микропластика в водах реки Северная Двина в безледный период 2019–2021 гг. находились в диапазоне от 0 до 0.005 штук/м<sup>3</sup>. Данные по выносу частиц микропластика в море в среднем находятся на одном уровне и практически не меняются со сменой сезона. Средняя концентрация микропластика за исследованный период составила 0.003 штук/м<sup>3</sup> или 7.5 мг/м<sup>3</sup>. Подобные данные для Северной Двины получены впервые и представляют интерес с точки зрения оценки арктических рек как потенциального источника микропластика. Данные исследования подтверждают, что воды Северной Двины способны переносить частицы микропластика в Белое и Баренцево моря, но сток этой реки нельзя назвать доминирующим фактором загрязнения в данных акваториях. В то же время, Северная Двина может выступать в качестве источника вторичного микропластика из-за наличия в пробах мезо- и

макрочастиц, которых практически не обнаружено в сопряженных с этой речной системой морях. Сравнение с реками, которые также несут на себе антропогенную нагрузку, показало, что Северная Двина является сравнительно чистой речной системой и обнаруженные в ней концентрации ниже на 1–2 порядке, чем в подобных речных системах Европы и Азии.

Впервые получены количественные значения концентрации микропластика для Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей в разные годы и в разные месяцы безледного периода. Показано, что максимальная концентрация в исследуемом регионе наблюдается в высокосолёных водах юго-восточной части Баренцева моря и западной части Карского моря. Пространственное распределение микропластика обусловлено распространением вод речных плюмов и более солёных вод Атлантического происхождения. Концентрации микропластика уменьшаются с запада на восток от Баренцева моря к морю Лаптевых. Пространственное распределение плавающего макромусора повторяет характер распределения микропластика. Полученные результаты указывают, что основным источником пластикового загрязнения в Евразийской Арктике являются воды Атлантического происхождения. В осенний сезон наблюдается рост концентраций от 2019 к 2021 году в высокосолёных водах. Уровень загрязнения вод речных плюмов остается стабильным. В изучаемый период изменяется воздействие всех потенциальных источников микропластика в Карском море: ледовой обстановки, стока рек, проникновения поверхностной баренцевоморской воды, влияния плюма реки Печоры. По этой причине невозможно выделить доминирующий фактор, вызывающий рост концентраций, поэтому все источники стоит рассматривать в совокупности.

Полученные данные уникальны и представляют интерес для модельных исследований, подсчета баланса пластика в окружающей среде. Они опубликованы в международных изданиях в соответствии с последними рекомендациями, поэтому могут использоваться другими группами для корректного сравнения между собой. Для более глубокого понимания

загрязнения Арктики, следующим важным шагом должны стать более детальные исследования поступления частиц пластика из Атлантического и Тихого океанов. Также необходимо больше данных о загрязнении и потенциальном транспорте микропластика водами Оби, Енисея, Лены и других крупных арктических рек.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:*

1. Pakhomova S. Polymer type identification of marine plastic litter using a miniature near-infrared spectrometer (MicroNIR) / S. Pakhomova, **I. Zhdanov**, B. van Bavel // Applied Sciences. – 2020. – V. 10 – №23. – P. 8707.
2. Pogojeva M. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas / M. Pogojeva, **I. Zhdanov**, A. Berezina et al. // Marine Pollution Bulletin. – 2021. – V. 166. – № March. – P. 112201–112210.
3. **Zhdanov I.** Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean / **I. Zhdanov**, A. Lokhov, A. Belesov, A. et al. // Marine Pollution Bulletin. – 2022. – V. 175. – P. 113370–113377.
4. Pakhomova S. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica / S. Pakhomova, A. Berezina, A.L. Lusher, **I. Zhdanov**, K. Silvestrova, P. Zavialov, B. van Bavel, E. Yakushev // Environmental Pollution. – 2022. – V. 298. – P. 118808–118820.
5. **Zhdanov I.** Differences in the fate of surface and subsurface microplastics: A case study in the Central Atlantic / **I. Zhdanov**, S. Pakhomova, A. Berezina et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – V. 11. – № 1. – P. 210–220.

*Тезисы докладов на российских и международных научных конференциях:*

6. **Zhdanov I.** Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter in Arctic seas Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR) / Zhdanov I., Pakhomova S., Bert van B. // Arctic Science Summit Week. – 2021. – P. 681.
7. **Жданов И.А.** Применение спектрометра ближнего инфракрасного диапазона MicroNIR для качественного анализа морского пластикового мусора / **Жданов И.А.**, Пахомова С.В., ван Бавель Б. // Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 18–24 апреля 2021 г. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – 2021. – С. 451–452.
8. **Zhdanov I.** Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic ocean / **Zhdanov I.**, Lokhov A., Belesov A., Kozhevnikov A., Pakhomova S., Berezina A., Yakushev E. // vEGU21, the 23rd EGU General Assembly. – 2021. – № 20. – P. 15650.
9. Illinskaya A. HAMPSTER: Harmonization of methods of marine microplastic assessment in the Arctic. Results of fieldwork 2021 / Illinskaya A., Yakushev E., Pakhomova S., **Zhdanov I.**, Berezina A., Gebruk A. // Arctic Frontiers 2022 Pathways. – 2022. – P. 99–100.
10. **Zhdanov I.** Microplastic pollution of the Kara Sea surface in different seasons / **Zhdanov I.**, Pakhomova S., Mekhova O., Pogojeva M., Berezina A., Novikov M., Gettikh N., Evenkova T., Osadchiev A., Stepanova N., Semiletov I., Yakushev E. // EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria - 2022. – № 22. – P. 425