

1. Актуальность и новизна работы

Растущее производство и потребление искусственных пластиков постепенно привело к глобальному загрязнению окружающей среды. Реки играют важнейшую роль в круговороте микро- и субмикропластика (< 5 мм) и являются первичными приемниками загрязнителя, поступающего со сточными водами и из диффузных источников. Микропластик (МП) проникает в водные и наземные пищевые цепи, что подтверждается обнаружением частиц в живых организмах почти на всех трофических уровнях. В связи с этим загрязнение природных сред МП представляет собой комплексную проблему с прямыми и отдаленными последствиями для экосистем и здоровья населения. Мониторинг загрязнения природной среды в бассейнах крупных рек частицами искусственных полимеров, обнаружение и контроль его источников важны для безопасности среды обитания и качества жизни.

Комплексные исследования, посвященные загрязнению внутренних вод российской Евразии и Центральной Азии, биоаккумуляции, трофическому переносу и экотоксикологии МП в пресноводных экосистемах, до начала проекта отсутствовали. Количественные данные для этой на огромной территории не были представлены на мировой карте загрязнения гидросферы. Реки Сибири были совершенно не исследованы на предмет обилия и источников МП, хотя загрязнение арктических морей было документально подтверждено. Неизученными оставались и вопросы, связанные с вовлечением МП в биологический круговорот в бассейнах рек Арктического бассейна и бессточного бассейна Аральского моря, участием живых организмов в перераспределении, транспорте загрязнителя и пищевой безопасностью. Отчасти недостаточное развитие исследований в области распространения МП в пресных водах и биоте связано с несовершенной методологией отбора и анализа природных проб.

Настоящий проект стал первым в РФ примером многопланового исследования и научно-технических разработок в области мониторинга и контроля распространения пластикового загрязнения поверхностных вод.

2. Достигнутые научные и научно-технические результаты

2.1 Разработка методологии и системы мониторинга загрязнения

Коллективом разработано и запатентовано устройство системы «Манта» ПП-3 для отбора проб поверхностных вод для анализа на МП и способ отбора проб с его помощью, Рис. 1. Устройство может применяться как с плавсредства, так и с берега; позволяет параллельно отбирать три индивидуальные пробы воды, что существенно экономит время на отбор проб; одновременно обеспечивает учет объема воды за счет встроенного расходомера, что обеспечивает точность анализа.

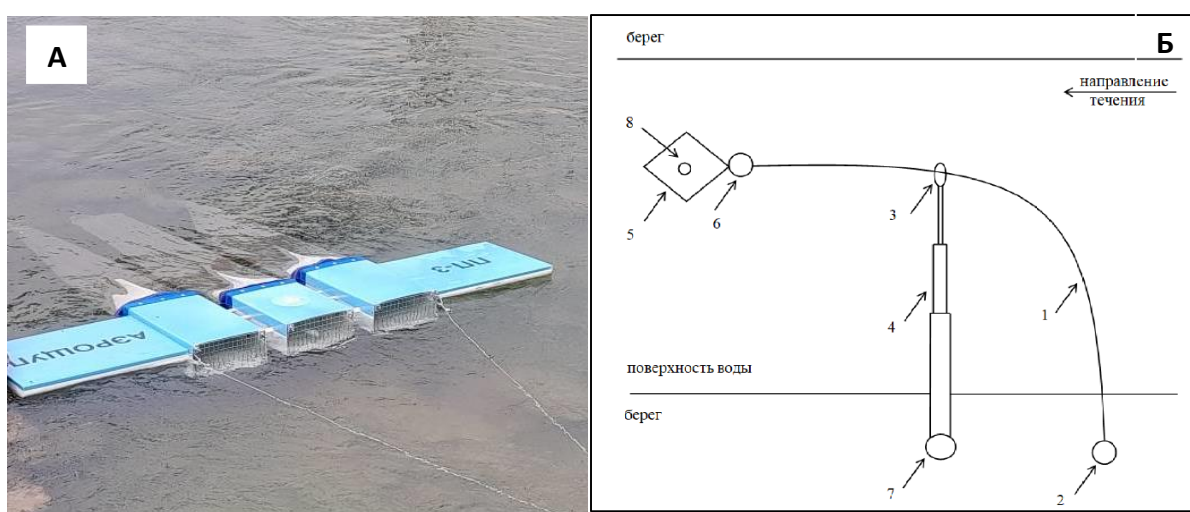


Рисунок 1. Устройство для отбора проб воды ПП-3 (А) и схематичное изображение способа отбора проб на водотоках (Б)

Для реализации проекта разработаны лабораторные протоколы обработки проб воды, донных отложений, снега, органов и тканей живых организмов для извлечения МП, основанные как на литературных данных, так и на авторских способах. Создано и зарегистрировано в Государственном реестре программное обеспечение для сбора и обработки информации о состоянии окружающей среды и автоматического создания графических отчётов, а также для обработки графической информации для количественной оценки частиц микропластика и их идентификации.

Впервые в РФ созданы база данных и интерактивная карта исследований микропластика в водных объектах и биоте на Интернет-сайте проекта (Рис. 2А). Ближайшим аналогом является карта глобального

распространения пластикового мусора и микропластика <https://litterbase.awi.de/litter> (Германия), в которую не включена основная масса данных по пресным водам РФ. Разработана наблюдательная сеть, которая включает апробированные и доступные точки отбора проб поверхностных вод рек с точными географическими координатами (Рис. 2Б). Сеть создана на платформе Yandex-карты и снабжена доступом по ссылке.

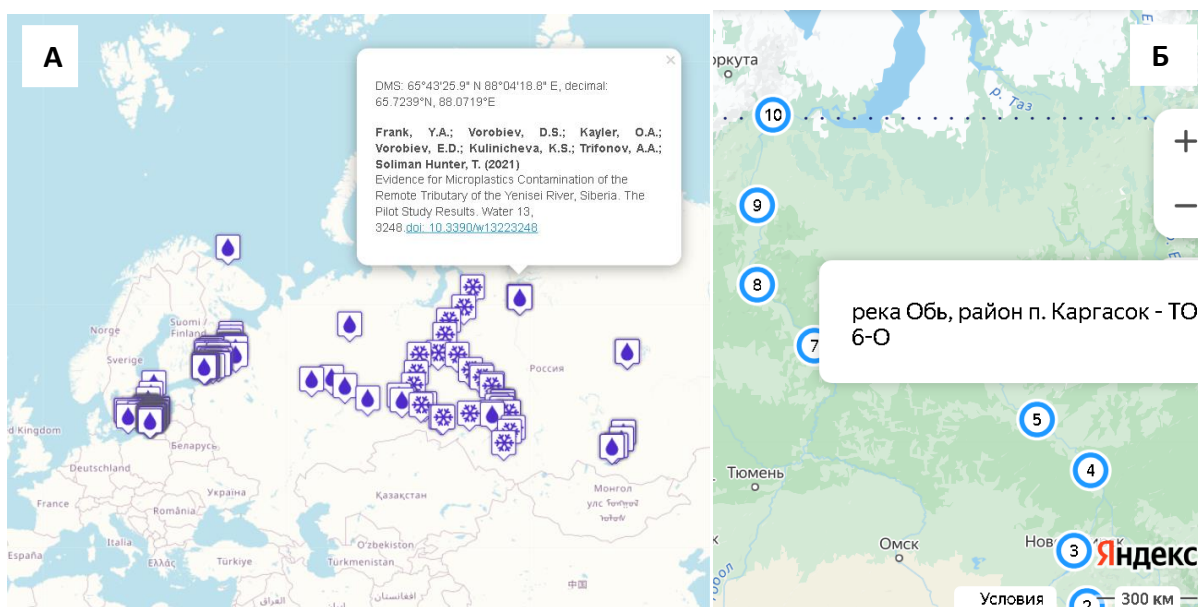


Рисунок 2. Интерактивная карта исследований в РФ (А) и фрагмент наблюдательной сети на платформе Yandex-карты (Б)

Разработанная система мониторинга содержания микропластика в поверхностных водах рек РФ удостоилась золотой медали в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках выставки НИ-ТЕСН (Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2023 г.).

2.2 Результаты количественного анализа загрязнения рек

В ходе проекта в 2020–2023 гг. выполнен скрининг пластиковых частиц в размерном диапазоне 0.15–5.00 мм в реках, принадлежащих к бассейнам Печоры, Волги, Оби и Иртыша, Енисея, и двух притоков Сырдарьи – р. Карадарья и р. Чирчик в Центральной Азии. Всего обследовано 14 рек. Наиболее детализированные исследования выполнены для Оби и Енисея с притоками, т.к. речные системы Сибири – потенциально значимый транспортный путь для попадания частиц МП в арктические воды. Средняя

концентрация МП в воде Оби была значимо ($p < 0.01$) выше по сравнению со средней концентрацией в Енисее, а в донных отложениях наблюдалась обратная ситуация в пересчете на кг, но не было отличий в обилии МП на единицу площади дна (Таблица 1).

Таблица 1. Содержание МП с известным полимерным составом в реках

Река	МП в воде, ед./м ³		МП в ДО, ед./кг		МП в ДО, ед./м ²	
	Среднее	Min–Max	Среднее	Min–Max	Среднее	Min–Max
Енисей	1.41±0.73	0.10 – 2.33	310±256	15.6 – 858	1099±1221	60.9 – 4182
Обь	4.84 ±2.55	1.06 – 8.94	29.2±19.2	2.22 – 78.5	958±876	121 – 2337
Чирчик	0.95±0.36	0.27 – 1.49	244±28.9	187 – 273	4459±527	3405 – 4986
Карадарья	4.28±0.09	4.19 – 4.46	333±11.5	313 – 353	22160±768	20830 – 23490

В воде притоков Сырдарьи концентрации МП были сопоставимы с реками Сибири. В донных отложениях рек Чирчик и Карадарья выявлено значительно больше МП ($p < 0.01$) по сравнению с системами Оби и Енисея в пересчете на площадь дна. Отличия связаны с региональными особенностями управления отходами и различной эффективностью очистки сточных вод. Морфологические и полимерные «профили» МП в исследованных реках также отличались (Рис. 3), что отражает специфику источников загрязнения.

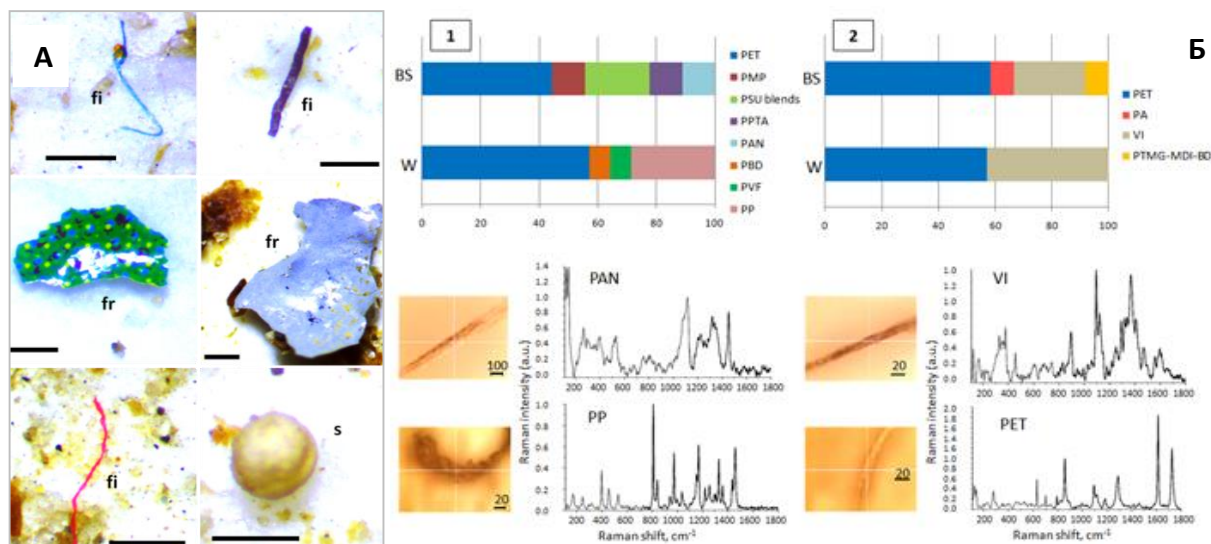


Рисунок 3. Примеры МП из донных отложений Оби, линейка 0.5 мм (А) и полимерный «профиль» МП в реках Чирчик (Б–1) и Карадарья (Б–2), определенный методом микро–Рамановской спектроскопии

Общей чертой загрязнения всех исследованных рек является обилие волокон полиэтилентерефталата (PET), что указывает на значимый вклад

синтетического текстиля в поступление МП. Были выявлены наиболее значимые источники загрязнения рек (Рис. 4), среди которых фрагментация пластикового мусора, бытовые и промышленные сточные воды, рыболовство.

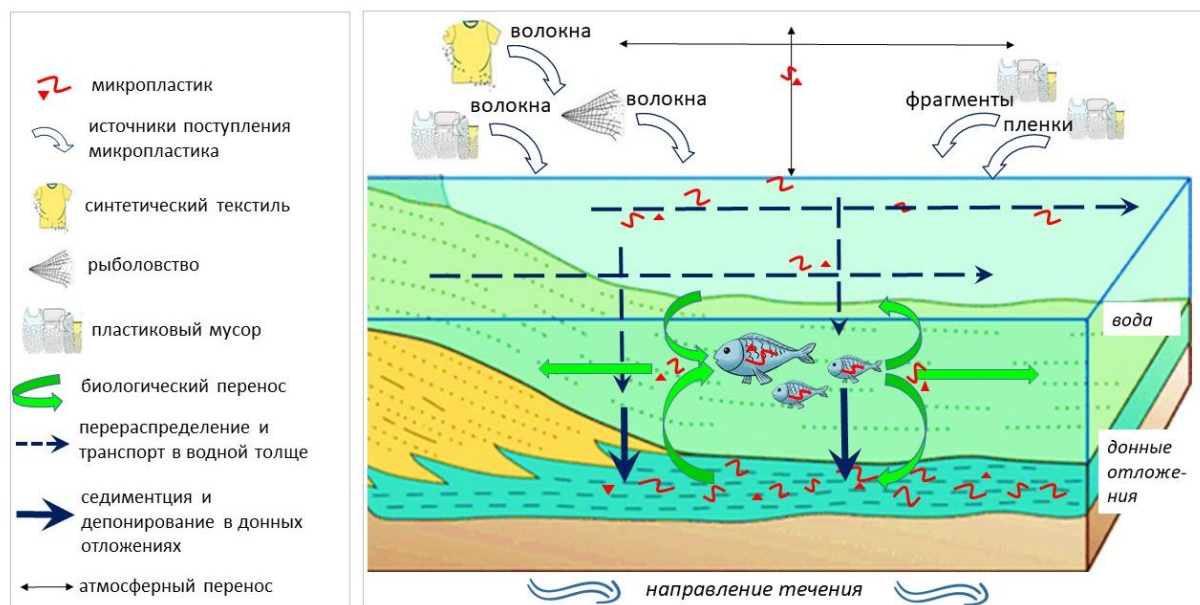


Рисунок 4. Источники и векторы транспорта МП в исследованных реках

Хотя в некоторых исследованиях отмечается накопление МП в реках вниз по течению, мы не обнаружили достоверной тенденции к увеличению концентраций в воде или донных отложениях Оби и Енисея. Это опровергает распространенное мнение о том, что все реки действуют как конвейер, собирая МП и вынося его большую часть в океаны.

В ходе проекта выявлены дополнительные факторы, влияющие на уровень загрязнения рек и распределение частиц. Установлено, что донные отложения могут аккумулировать и высвобождать МП в речных экосистемах, являясь при этом его вторичными источниками, а гидробионты служат дополнительным вектором перемещения частиц в реках. В ходе проекта определена скорость захоранивания МП на примере частиц полипропилена в донных отложениях под действием водных олигохет *Tubifex tubifex*, которая составила для пресноводных илов 4.14 ± 1.29 см/год. Депонирование МП под действием организмов макрозообентоса может способствовать вовлечению частиц в трофические цепи в самих отложениях и снижает «нагрузку» на макрофауну, питающуюся на их поверхности.

2.3 Результаты анализа загрязнения снегового покрова в бассейне Оби

Выполнен масштабный скрининг содержания микропластика в снеговом покрове в бассейне Оби за 2020–2023 гг. Объект исследования выбран исходя из значимой роли таяния снегов в формировании поверхностного стока рек. Частицы МП детектированы в образцах снега из всех исследованных географических сайтов от Алтайских гор до Арктики (Рис. 5). Минимальное и максимальное содержание МП за период наблюдений составило от 0.47 ± 0.81 до 22.6 ± 18.0 ед./л. В пересчете на квадратный метр выявлено (в разных сайтах) до 2817 ± 915 ед. и 4444 ± 1530 мг МП. Фактические концентрации МП и антропогенных волокон в пробах снега в рамках трехлетнего мониторинга находились в приблизительно одинаковых пределах. Концентрации МП по годам значимо не различались ($p > 0.05$), тогда как в отдельных сайтах содержание частиц отличалось по годам. Подавляющее большинство проб снега, отобранного в бассейне Оби, помимо МП и волокон вискозы, содержали микрофрагменты автомобильных шин.

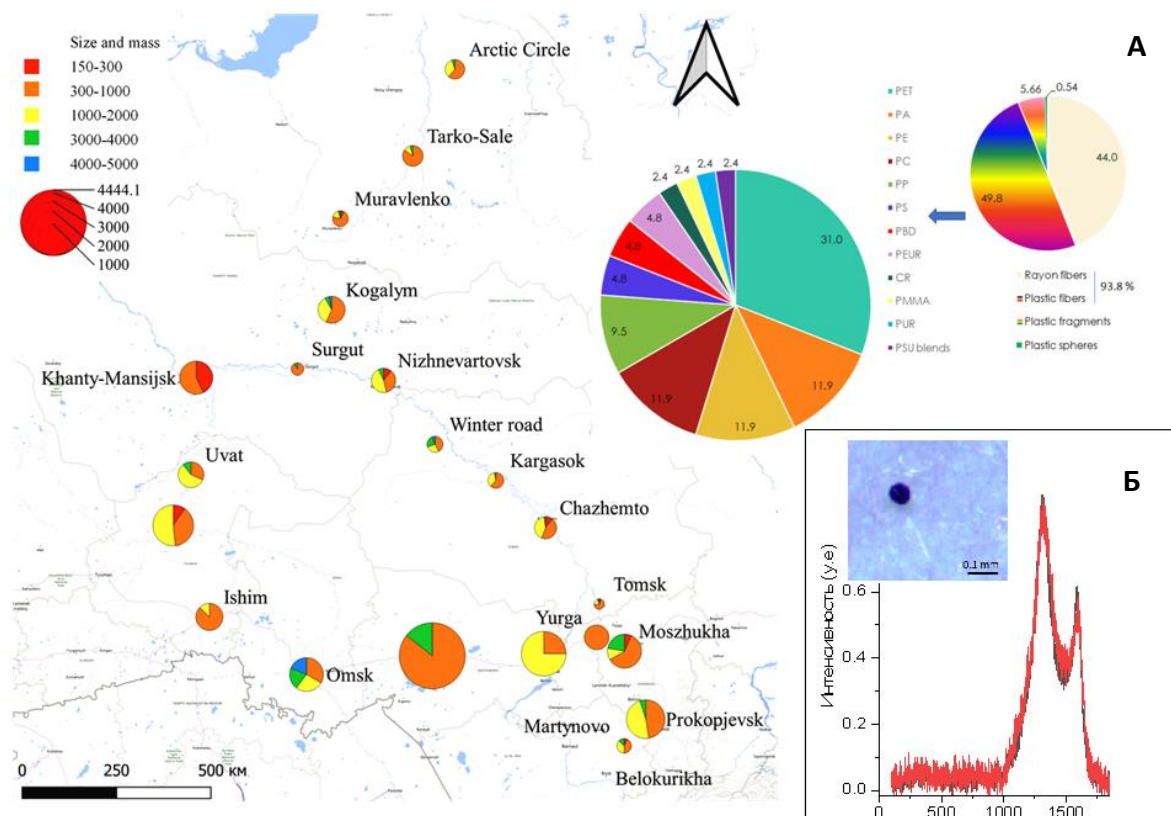


Рисунок 5. Распространение МП в снеговом покрове в бассейне Оби и данные спектроскопического анализа частиц (А), фрагмент шины из проб снега (Б)

2.4 Результаты биоиндикации загрязнения речных бассейнов и экспериментов по потреблению, аккумуляции и эффектам микропластика

Проведена количественная оценка потребления и накопления микропластика промысловыми рыбами в бассейнах Оби, Енисея, Северной Двины и Сырдарьи; амфибиями, рептилиями и насекомыми, в том числе амфибионтными, в бассейнах сибирских рек. Потребление МП рыбами доказано всех речных бассейнов на примере видов с разными трофическими стратегиями. МП детектирован в ЖКТ 73.6% особей от совокупности выборок из речной системы Оби (в среднем 2.80 ± 3.68 ед./особь), 51.4% рыб из водоемов бассейна Северной Двины (2.95 ± 0.92 ед./особь) и в 44% рыб из Енисея (1.36 ± 4.51 ед./особь). С использованием единой методологии анализа установлено, что бентофаги потребляли значительно больше ($p < 0.05$) МП по сравнению с другими группами. В целом, закономерность содержания МП в ЖКТ рыб можно выразить следующим образом: бентофаги > эврифаги \geq хищники > планктофаги. Уровень аккумуляция МП в жабрах не зависел от трофической стратегии, но частицы были более разнообразным у бентофагов.

Впервые на территории российской Евразии МП зарегистрирован в личинках и желудочно-кишечном тракте взрослых особей бесхвостых амфибий (*Bufo bufo* и *Rana amurensis*), трех видов рептилий (ящериц *Lacerta agilis*, *Zootoca vivipara* и обыкновенной гадюки *Pelias berus*) и коже гадюки. Показано, что уровень накопления МП у взрослых амфибий и рептилий зависит от особенностей экологии видов, а также может отражать уровень загрязнения среды. В личинках амфибий обилие МП обратно зависит от стадии развития и связано со сменой типа питания в ходе онтогенеза.

Проведено изучение динамики накопления МП в кишечном тракте наземных насекомых на примере коллекционных образцов ос *Vespula vulgaris* за 10 летний период. В последние годы возрастает доля волокон >1 мм и мелких фрагментов, что может свидетельствовать о распаде МП в окружающей среде и отражать тенденцию к увеличению применения синтетических тканей населением.

В модельных экспериментах изучено накопление микропластика амфибионтными насекомыми на примере комаров *Aedes aegypti* на разных стадиях онтогенеза (Рис. 6А). Экспериментально доказано, что у насекомых с метаморфозом микрочастицы полистирола (PS) могут переходить от питающихся личинок в непитающихся куколок и вылетающих на сушу имаго. Экспериментально доказано, что PS сферы и фрагменты PP, HDPE и PS не оказывают существенного влияния на жизнедеятельность *Ae. aegypti*.

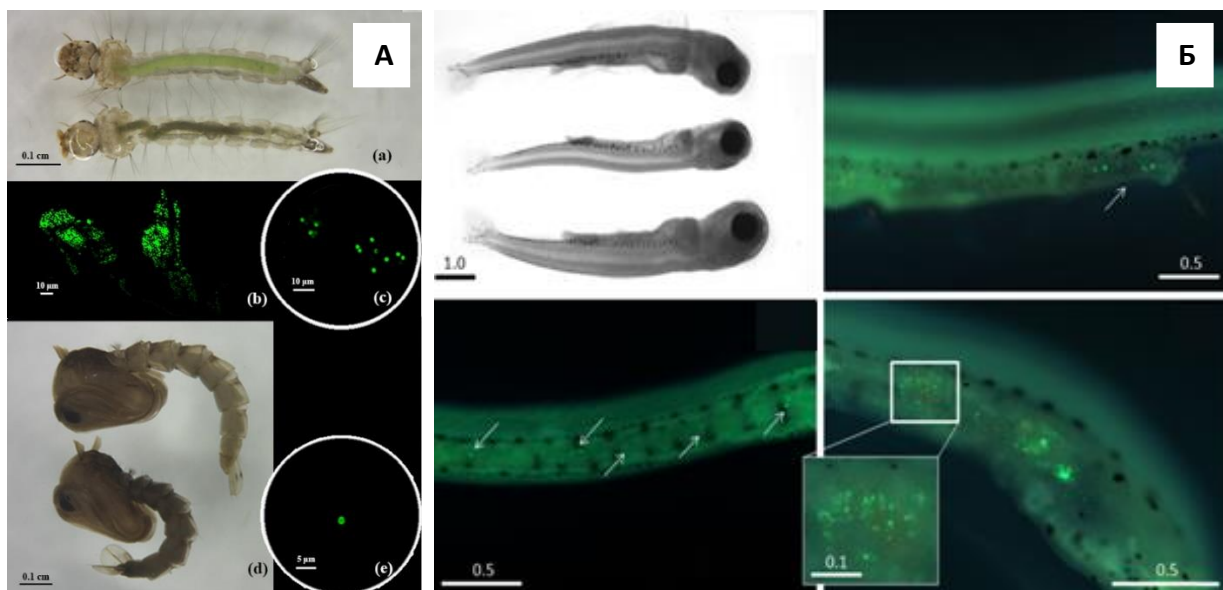


Рисунок 6. МП диаметром 2 мкм в личинках и куколках комаров (А) и личинках пеляди (Б)

В модельных экспериментах установлено, что ранняя молодь ценных промысловых рыб, пеляди *Coreginus peled* и стерляди *Acipenser ruthenus*, потребляет PS микросферы диаметром 2 и 10 мкм из воды. При этом количество проглоченных частиц пропорционально их концентрации в среде, но не зависит от времени экспозиции. Оценены также скорости выведения МП разного диаметра после поглощения личинками стерляди (от 6.20 до 21.7 ед./мг/сутки). Показано, что PS диаметром 2 мкм, попадая в желудочно-кишечный тракт молоди рыб, приводит к стимулированию специфической активности панкреатических и пристеночных пищеварительных ферментов через 6 суток. Отмечено достоверное повышение удельной активности каталазы, что свидетельствует об индуцированной модуляции окислительного стресса у рыб в присутствии МП.

3. Практическая значимость и социально-экономический эффект

Возможность биоаккумуляции и трофического переноса микропластика и ассоциированных загрязнителей является серьезной проблемой, так как морские и пресноводные водные ресурсы – важнейший источник белка для человека. Крупные реки являются местообитанием для многих экономически важных пресноводных беспозвоночных и рыб. В результате проекта получен огромный массив данных, характеризующих масштаб и особенности поглощения микропластика рыбами и другими водными и наземными животными, влияние живых организмов на перераспределение загрязнителя в речных системах, скоростях потребления и выведения и физиологических эффектах пластиковых частиц. Публикуя результаты исследований по проекту в открытой печати, освещая ход работы в средствах массовой информации и на тематических лекциях, коллектив формирует у общественности достоверное и научно обоснованное представление о проблеме загрязнения окружающей среды микропластиком, его масштабах и последствиях.

В настоящее время в РФ ведутся работы по созданию и внедрению системы нормирования сбросов микропластика промышленными предприятиями и муниципальными очистными сооружениями. В ходе выполнения проекта разработано оборудование и методики для отбора и лабораторного анализа природных проб с целью количественного учета микропластика. Проведены мастер-классы по отбору проб речных вод, в том числе с участием представителей Федеральной службы по надзору в сфере природопользования и ФГБУ «ЦЛАТИ». Получены количественные данные, характеризующие фактические концентрации загрязнителя в бассейнах Оби, Енисея и других рек, которые будут востребованы при разработке и обосновании нормативов допустимого содержания микропластика в водотоках. Применение системы мониторинга содержания микропластика в поверхностных водах рек РФ с использованием результатов проекта позволит повысить качество жизни населения в долгосрочной перспективе.