

Comparing the efficiency of two water sampling methods for studying the content of microplastics in water bodies

Tikhonova D.A.^{1,2*}, Shalunova E.P.², Karetnikov S.G.¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Sevastyanova, 9, St. Petersburg, 196105, Russia

² Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7-9, St. Petersburg, 199034, Russia

ABSTRACT. Due to the lack of a unified sampling methodology for studying microplastics, there are difficulties in comparing the results obtained when sampling using different methods. A comparison was made of a pump filtration system and a Manta trawl to assess their effectiveness and applicability in collecting water samples for studying microplastics content using the example of Lake Ladoga, the Svir River and small lakes in the Leningrad region (Sukhodolskoye, Michurinskoye, Krasnoye). The results supported that despite higher average microplastics concentrations when sampling with the pump system (8.5 ± 11.5 particles/m³) compared to the Manta trawl (0.7 ± 0.6 particles/m³), the data were comparable. The methods have opposite advantages and disadvantages and are complementary. The Manta trawl is more suitable for collecting large volumes of water from the surface layer relatively quickly and in conditions with high contents of suspended matter present. Meanwhile, the pump filtration system is suitable for collecting samples at different water layers and in the surface layer of water when there is a small content of suspended matter and provides more accurate estimating of the sample volume. It is necessary to ensure the sampling of a large volume of water, which in the case of a pump filtration system is only possible during the period when the plankton content and water turbidity are minimal.

Keywords: microplastics, water sampling, Manta trawl, pump filtration system, microplastic pollution

For citation: Tikhonova D.A., Shalunova E.P., Karetnikov S.G. Comparing the efficiency of two water sampling methods for studying the content of microplastics in water bodies // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - P. 1434-1453. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1434

1. Introduction

Currently, there is no unified universal methodology for the analysis of microplastic particles in the aquatic environment. Different scientific groups use various sampling methods and laboratory processes, which influence the size range of the particles studied and the units of measurement. As a result of these differences, methodological difficulties arise when comparing the obtained data with the results of other studies.

In world practice, both pump filtration systems (Song et al., 2018; Choy et al., 2019; Eo et al., 2019; Zobkov et al., 2019; Tamminga and Fischer, 2020; Ershova et al., 2021) and towed nets (Reisser et al., 2015; Kooi et al., 2016; Dris et al., 2018; Liedermann et al., 2018; Lenaker et al., 2019; Egger et al., 2020; Frank et al., 2021; Il'ina et al., 2021) are mainly used to collect water samples for microplastics. Pump filtration systems can be used to sample both from the surface

layer of the water column and from other water layers (Tikhonova et al., 2024), while nets are more often used to collect samples specifically from the surface layer of a water body (Campanale et al., 2020; Pasquier et al., 2022) and less often from other water layers (Kooi et al., 2016; Liedermann et al., 2018; Lenaker et al., 2019; Egger et al., 2020). Among the nets, the most commonly used for sampling microplastics are Manta trawls (Karlsson et al., 2020; Pasquier et al., 2022). Other sampling methods, such as the Niskin sampler (Bagaev et al., 2017) or the Rosette sampler system (Dai et al., 2018) are less common.

These methods have opposite characteristics. For instance, the filtering area of a Manta trawl is much larger than that of other samplers, allowing a larger volume of water to be filtered in a shorter period of time. Such nets more often retain large particles, which are less common in the water column (Tamminga et al., 2019; Karlsson et al., 2020), but there is a risk for par-

*Corresponding author.

E-mail address: tdasha94@mail.ru (D.A. Tikhonova)

Received: June 25, 2024; **Accepted:** November 01, 2024;

Available online: December 25, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



ticle loss and external contamination when the sample is washed off the net. At the same time, Manta trawls, neuston, and other nets often have mesh sizes $\geq 300 \mu\text{m}$ (Dusaucy et al., 2021). The use of large mesh nets may result in losses of smaller particles that are prevalent in water bodies (Lindeque et al., 2020). The use of mesh nets sized $< 100 \mu\text{m}$ (Dris et al., 2018; Song et al., 2018) increases the range of particle sizes obtained and leads to a more accurate evaluation of microplastic content.

Meanwhile, pump filtration systems allow estimating the volume of filtered water more accurately and avoiding losses and external contamination. However, the sample volume is usually significantly smaller due to the relatively small filtering area and its rapid clogging with suspension. Moreover, it takes much more time to collect a significant volume of water samples (at least 1 m^3). Niskin bottles and other bathometers minimize the likelihood of external contamination, but significantly limit the volume of a sample taken. A smaller volume of filtered water may result in an overestimation of microplastic particles in a water body, so it is recommended to sample as much water as possible to obtain more accurate results. At present, there is no consensus on specific recommendations for minimum sample volume, but this is being discussed within the scientific community. For example, in the Resolution of the I All-Russian conference with international participation on environmental pollution with microplastics “MicroPlasticsEnvironment-2022” (Rezolyuciya..., 2022) the minimum proposed sample volume is 1 m^3 . However, this is not always possible for pump filtration systems due to the tendency of the mesh to become obstructed by plankton and other suspended matter and for Niskin bottles due to the relatively limited volume of samples.

There is limited research on the comparison of pump filtration systems and Manta trawls, the methods most commonly used to collect water samples when

studying microplastics in water bodies (Tamminga et al., 2019; Karlsson et al., 2020; Du et al., 2022; Montoto-Martínez et al., 2022; Frank et al., 2024). Researchers seldom reach clear conclusions about which method is most applicable for a given purpose. For example, Tamminga et al. (2019) and Frank et al. (2024) argue that the two methods are not interchangeable but complementary due to their differences.

The purpose of this research was to compare two different water sampling methods (a pump filtration system and a Manta trawl) for determining the content of microplastics. Furthermore, their convenience, efficiency, and applicability to the studied water bodies were analyzed, as well the characteristics of microplastics in samples collected by these methods were evaluated.

2. Materials and Methods

For the study, Lake Ladoga, its tributary the Svir River, and three small lakes in the Leningrad region (Sukhodolskoye, Michurinskoye and Krasnoye) were chosen. Lake Ladoga and its tributaries have been studied for microplastics content since 2018 (Ivanova and Tikhonova, 2022), but the small lakes of the Priozersk district (Sukhodolskoye, Krasnoye and Michurinskoye) have yet to be studied in the existing body of empirical research. 85% of the river flow into Lake Ladoga comes from 3 main tributaries: the Svir, the Volkhov and the Burnaya (the Vuoksa) rivers (Lake Ladoga..., 2015). Sukhodolskoye Lake is the source of the Burnaya River, which flows into Lake Ladoga and is one of the main tributaries of Ladoga along with the Svir River. Therefore, evaluating its microplastic content would be useful for better understanding the amount of microplastics entering lakes with river runoff. Krasnoye and Michurinskoye lakes were chosen due to their close geographical location (Fig. 1).

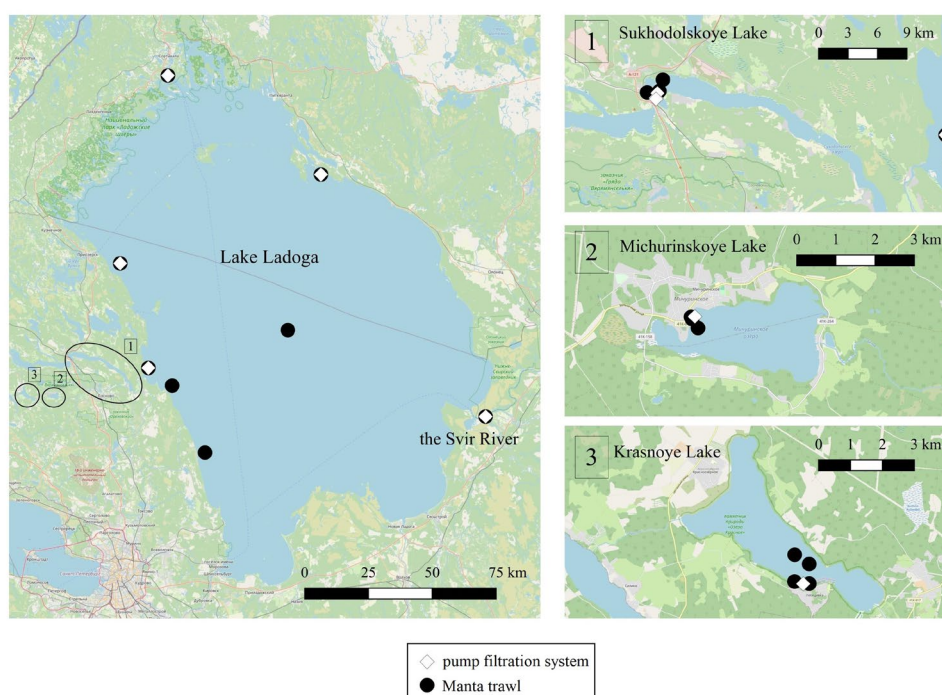


Fig.1. Sampling sites in Lake Ladoga and the Svir River, Sukhodolskoye Lake, Michurinskoye Lake and Krasnoye Lake.

A special pump filtration system (Fig. 2), which allows taking water samples from various water layers was used. This device was developed at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences in 2019 by one of the authors of this article, S.G. Karetnikov.

The filtration system included a household submersible pump with a bottom water intake of 300 W of power. Due to the length of the power supply cable, pumps of this type can be lowered to a depth of no more than 10 m. Furthermore, as external pressure increases, the valve that prevents the reverse flow of water in the pump no longer functions. In this regard, to create continuity of the flow, the pump was placed in the surface layer of water. Depending on the required water layer, a set of hoses of various lengths easily connected to each other with connectors can be used to take water samples. At the bottom of the pump there was a sealed elastic adapter from the water intake part of the pump to the hose. A filtration system with a 100 μm mesh was located at the end of the hose, all connections were secured with threaded clamps. Water filled the hose under hydrostatic pressure, and a pump removed water from the top of the hose. The volume of filtered water was measured using a household water meter located at the outlet of the pump. A valve was installed at the junction of the hose with the filtration system, allowing water to flow in only one direction to prevent the contents of the mesh from being washed out when the system was lifted.

Samples were taken from the surface layer of a water body either from on board the research vessel "Ecolog" or from an inflatable motor boat using an electric generator. When the volume of water pumped through the mesh, per unit time decreased significantly, the filtration stopped. The mesh was removed from the filtration unit, placed in a container with distilled water, and replaced with a new 100 μm mesh. When the sample volume was small (up to 500 liters), several samples were taken from the same location to increase the representativeness of the sample.

For comparison, samples from the water surface layer were also taken using a Manta trawl (Fig. 3). The dimensions of the frame at the entrance were 600x257 mm, at the place where the net was attached - 600x154 mm (area 924 cm^2). A net which measured 2000x600 mm with a perimeter of 1508 mm was attached to the frame. The mesh size of the net was 100 μm . A cone sampler with the same mesh size was attached to the bottom of the net using a fan pipe and a threaded clamp.

Before sampling, the Manta trawl was washed in a lake without a cone sampler. Next, the sampler was attached to the net, the Manta trawl was lowered into the water and towed behind the boat or the research vessel at low speed for a certain time. Sampling in lakes Sukhodolskoye, Michurinskoye and Krasnoye was carried out from an inflatable motor boat. The net cables were attached to the boat that proceeded to trawl for 10-25 minutes (the choice of trawling time was determined by visually tracking the amount of suspended matter in the water) at an average speed of 1-3 km/h. In

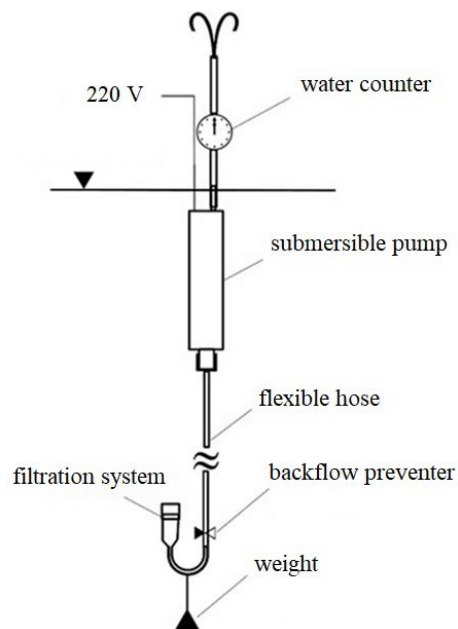


Fig.2. The scheme of a pump filtration system developed and used at the Institute of Limnology RAS - SPC RAS (Pozdnyakov et al., 2021).

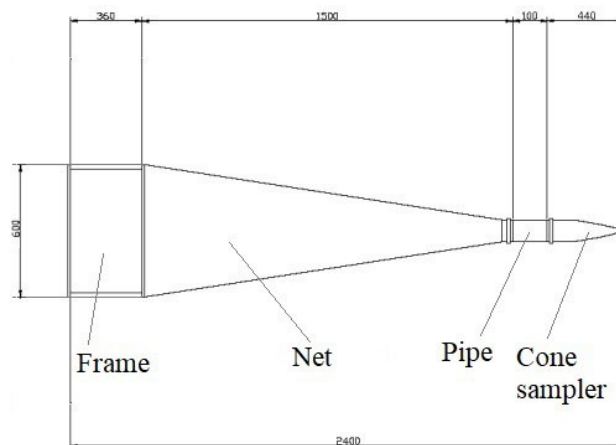


Fig.3. The scheme of a Manta trawl (mm).

Lake Ladoga, sampling was conducted from the board of the research vessel "Ecolog" during its braking. When the vessel's speed dropped, the Manta trawl was lowered into the water using a crane and trawled until the vessel stopped for an average of 3-5 minutes at an average speed of 3.4-4 km/h. The trawler's course, time and average trawling speed were recorded using a GPS navigator. Next, the Manta trawl was lifted from the water using a crane and washed above the water from the side of the vessel using a hose and lake water. Next, after being brought on board, a sample was removed from the system and the material was removed into a container using distilled water. The sample volume was assessed taking into account the area of the frame at the location where the net was attached (924 cm^2) and the average trawling speed. Until the laboratory analysis stage, samples were stored refrigerated.

The samples were collected in August 2023. In all of the water bodies, a total of 19 samples were taken using a Manta trawl and 21 samples were taken using a pump filtration system. Samples were collected over a short period of 1-2 days from lakes Sukhodolskoye, Michurinskoye, and Krasnoye (3-5 samples using each method), as well as the Svir River (2 samples using each method). Given the close proximity of collection sites at each location, grab samples were combined into composite samples, respectively. From Lake Ladoga, grab samples were collected using a Manta trawl at 7 different sites (1 sample at each site) and with a filtration system at 4 different sites (2 samples at each site) located at a significant distance from each other. Due to the significant distance between these sites, the results were considered as grab samples. To obtain reference values and make valid data comparisons, the concentrations and volume of samples for Lake Ladoga are presented as a range of the obtained values and as the arithmetic mean between the obtained concentrations. The volume of water in grab samples collected by the Manta trawl ranged from 9.7 to 120 m³, while in samples collected by the pump filtration system it ranged from 0.04 to 1.1 m³. The total volume of filtered water in samples taken by different methods is presented in Table 1. The significant difference in the volume of water when using different methods is explained by the aforementioned features of both sampling devices and the significant volume of suspended matter in the water during the season of sampling.

Laboratory processing of samples included dissolution of organic material using Fenton's reagent (30% hydrogen peroxide + Fe(II) catalyst). The samples collected by the Manta trawl contained a lot of organic material, and therefore their processing and subsequent analysis were significantly more labor-intensive and time-consuming compared to those collected by the pump filtration system. Samples taken with a Manta trawl were filtered through a 100 µm mesh and all large fragments (leaves, aquatic vegetation, insects, etc.) were thoroughly washed with distilled water on the same mesh and then removed. All filtered material was transferred to a thermal glass beaker where hydrogen peroxide was added along with a Fe(II) catalyst (the volume of the added reagent varied based on the volume of organic material). When processing the samples taken by a pump filtration system, the material from the mesh was washed into a thermal glass beaker with a similar reagent. Next, the sample was kept at a temperature of 75°C in a sand bath for approximately one hour. Hydrogen peroxide was then re-added to

the sample and the process continued until as much organic material was removed as possible. The process was repeated up to 4-5 times for samples taken by the Manta trawl. After dissolving the organic matter, the remaining material in the beaker was left for a day, after which it was filtered through a 100-µm mesh and washed off with distilled water onto Petri dishes (from 1 to 8 dishes per sample, depending on the volume of undissolved organic material). Next, the Petri dishes were covered with a 100-µm mesh and left until completely dry.

Blank samples with distilled water were processed in parallel with real samples to control the external contamination. During all stages of laboratory processing of field samples, blank samples were placed nearby open, after which they were processed in the same way (Fenton's reagent, filtering, washing onto a Petri dish). All stages of laboratory sample processing were carried out in a fume hood, a cotton gown was used, and all glassware and filter meshes were washed with distilled water immediately before use.

Once the material dried, the Petri dishes were analyzed under a microscope. Preliminary identification of microplastics included visual evaluation. Particles with the absence of a cellular structure with a uniform thickness and color were selected. Particles tentatively identified as mesoplastics (greater than 5 mm), microplastics (less than 5 mm), or material of anthropogenic origin were counted, photographed, and their size, shape (fibers, fragments, films), and color were documented. Next, the visibly largest particles least aggregated with organic material were transferred with a needle to a separate Petri dish for subsequent analysis of the chemical composition of the particles by spectral methods.

The analysis of the chemical composition of a sample of particles was carried out using Raman spectroscopy on the Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800 spectrometer at the Science Park of St. Petersburg State University (resource centre "Geomodel"). The interpretation was based on comparison with the available spectra in the Horiba JY Raman Library FORENSIC V2 database.

To determine the mass of microplastics, the length and width of the particles were measured using an optical microscope. To determine the mass of the fibers, cylindrical shape was inferred, consistent with existing literature (Simon et al., 2018; Leusch and Ziajahromi, 2021). The width of the fibers was taken as the diameter of the cylinder. Next, the volume of each particle was calculated, which then was multiplied by

Table 1. The total volume of water sampled by the Manta trawl and the pump filtration system

Water body	Volume of water, Manta trawl	Volume of water, pump filtration system
Sukhodolskoye Lake	300.7 m ³	1.1 m ³
Michurinskoye Lake	96.8 m ³	0.17 m ³
Krasnoye Lake	135.6 m ³	1.2 m ³
the Svir River	20.1 m ³	2.16 m ³
Lake Ladoga*	from 9.7 to 28.4 m ³	from 0.5 to 2.2 m ³

Note: *For Lake Ladoga, volumes are presented as ranges of the multiple grab samples

the density of the most common polymers in the environment (polypropylene and polyethylene) - 0.93 g/cm³.

Fragments and films were considered as paralepipeds. The largest length and width of the fragments were calculated using an optical microscope. If the third smallest dimension could not be determined under a microscope, for purposes of consistency 30 µm and 50 µm were the assumed values for films and fragments, respectively (note that all fragments were relatively flat in nature). Some of the largest particles were weighed on a Mettler ToledoXP205 analytical balance (division value - 0.01 mg, root mean square measurement error no more than 0.03 mg) at the St. Petersburg State University Science Park (resource centre "Centre for Diagnostics of Functional Materials for Medicine, Pharmacology and Nanoelectronics") to compare the calculated versus actual mass of the fragments. When a fragment's mass was below the scale's sensitivity threshold, particles were weighed in bulk (20 pieces), and each fragment's mass was calculated as 1/20 of the total sample mass.

Charts were created in Microsoft Excel 2019. QGIS 3.14.15 was used to create a map of sampling sites. During statistical analysis, the data distribution was evaluated using the Shapiro-Wilk test. Then the equality of microplastics concentrations in grab samples when sampling with a Manta trawl and the pump filtration system was analyzed using the Mann-Whitney U test. Spearman's rank correlation coefficient was used to assess the relationship between sample volume and microplastics concentrations. Calculations were made using the Statistics Kingdom website (Statistics Kingdom, 2017) and Microsoft Excel 2019.

3. Results

In blank samples, 0 to 5 fibers visually similar to microplastics were found. The average number of fibers in the blank samples was 1. The number of these particles in the blank sample was subtracted from the number of particles found in the field sample.

The average concentration of microplastics in the studied water bodies when sampling with the Manta trawl was 0.7 ± 0.5 particles/m³ (median 0.6 particles/m³), and when sampling with the filtration unit - 8.5 ± 11.5 particles/m³ (median 4.1 particles/m³). The number of microplastic particles, as well as estimated (particles/m³) and calculated mass concentrations of microplastics (mg/m³) for each water body are presented in Table 2.

The highest concentrations of microplastics were found in Lake Michurinskoye in samples collected using both methods, likely due to the sampling site being located near a highway and the beach being actively used for recreational purposes. However, significant concentrations obtained when sampling with the pump filtration system are most likely explained by the small total sample volume due to the large amount of suspended matter. The lowest concentrations were observed in Lake Krasnoye where samples were taken far from urbanized areas, as well as in Lake Ladoga, with the exception of the mouth of the Burnaya River. A comparison of estimated concentrations obtained by the Manta trawl and the filtration system is shown in Fig. 4.

In Lake Ladoga, where samples were taken at different sites, the highest concentrations of microplastics were obtained at the mouth of the Burnaya River,

Table 2. Numerical and mass concentrations of microplastic particles in different water bodies.

Water body	Number of particles sampled by the Manta trawl after taking into consideration the external pollution		Estimated concentrations*, particles/m ³ (Manta trawl)	Mass concentrations, mg/m ³ (Manta trawl)		Number of particles sampled by the pump filtration system after taking into consideration the external pollution		Estimated concentrations*, particles/m ³ (the pump filtration system)	Mass concentrations, mg/m ³ (the pump filtration system)	
	fibers	fragments		fibers	fragments	fibers	fragments		fibers	fragments
Sukhodolskoye Lake	128		0.4	0.004		6		5.5	0.009	
	109	19		0.0001	0.004	5	1		0.003	0.006
Michurinskoye Lake	136		1.4	0.1		5		28.9	0.004	
	100	36		0.001	0.1	4	1		0.002	0.002
Krasnoye Lake	21		0.15	0.0004		5		4.1	0.009	
	17	4		0.0001	0.0003	4	1		0.002	0.007
the Svir River	24		1.2	0.0003		2		0.9	0.00008	
	24	-		0.0003	-	2	-		0.00008	-
Lake Ladoga	93		0.6**	0.001		11		3.3**	0.002	
	88	5		0.0002	0.0008	11	-		0.002	-

Note: *concentration was calculated as the ratio of the sum of particles detected in the composite sample to the sample's total water volume

**for Lake Ladoga, the concentration was calculated as the arithmetic mean between the concentrations of particles in grab samples taken from different locations due to the significant spatial heterogeneity of this water body

which is one of the main tributaries of the lake (1.4 particles/m³ for samples taken by the Manta trawl, 10.8 particles/m³ in samples taken by the the pump filtration system). In the Svir River, which is also the main tributary of Lake Ladoga, microplastics sampled via Manta trawl also yielded higher concentrations than at other sampling sites (Fig. 5).

There was no significant correlation between grab sample volume and microplastics concentration (Spearman correlation coefficient, $r = 0.2$). The Shapiro-Wilk test showed a significant departure from normality ($W(19) = 0.9$, $p = 0.042$ for Manta samples, $W(21) = 0.52$, $p < 0.001$ for pump system samples). The Mann-Whitney U test showed that there were no statistically significant differences between the data on the concentration of microplastics in grab samples collected using the Manta trawl and the concentrations obtained during sampling with the pump filtration system ($p = 0.5$).

26 particles (fragments and films) were weighed on an analytical balance. The average weight of the smallest and lightest fragments (about 1 mm) was 0.03 mg. The largest fragments (several mm) – from 0.11 to 0.61 mg. When comparing the actual and calculated particle masses, they were found to be within the same order of magnitude and the difference between the samples was not statistically significant (Mann-Whitney U test, $p = 0.7$).

In reference to their longest dimension, the majority of particles found using both methods were in the range of 100-1000 μm (47%). This range was also divided into two: 100-500 μm and 500-1000 μm in order to estimate the proportion of microplastics of the smallest size. When sampling with the Manta trawl, the number of particles within the ranges of 100-500 μm and 500-1000 μm had approximately equal proportions

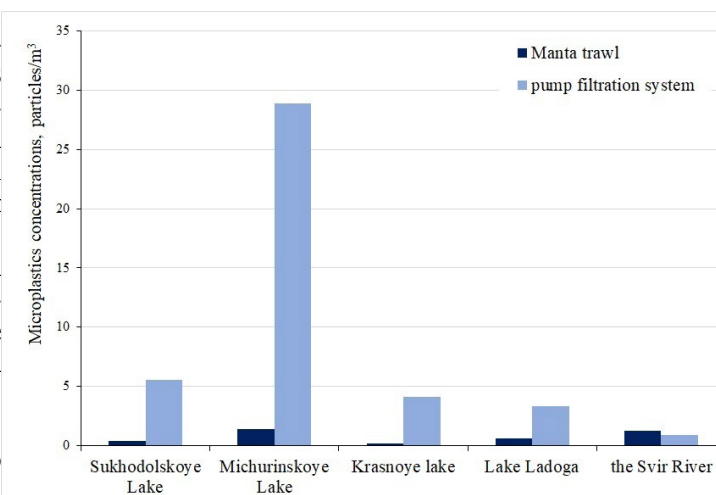


Fig.4. Quantitative concentrations of microplastics during sampling using different methods.

(22% and 25%, respectively). However, when sampling with the pump filtration system it was the smallest particles (100-500 μm) that predominated among all microplastic particles (41%) (Fig. 6). Simultaneously, mesoplastic particles (more than 5 mm) were found only during sampling by the Manta trawl. The number of particles decreased with increasing size, consistent with our previous studies (Tikhonova et al., 2024) and other works (Hale et al., 2020; Leusch et al., 2023).

106 particles were analyzed using Raman spectroscopy methods, and reliable polymer spectra were obtained for 44 particles. For 23 particles, only the spectra of various dyes were determined. 22 particles had strong fluorescence, rendering the determination of spectra inconclusive. The spectra of 17 particles could not be determined due to either discrepancies with reference values in the database or due to severe contamination of the respective sample.

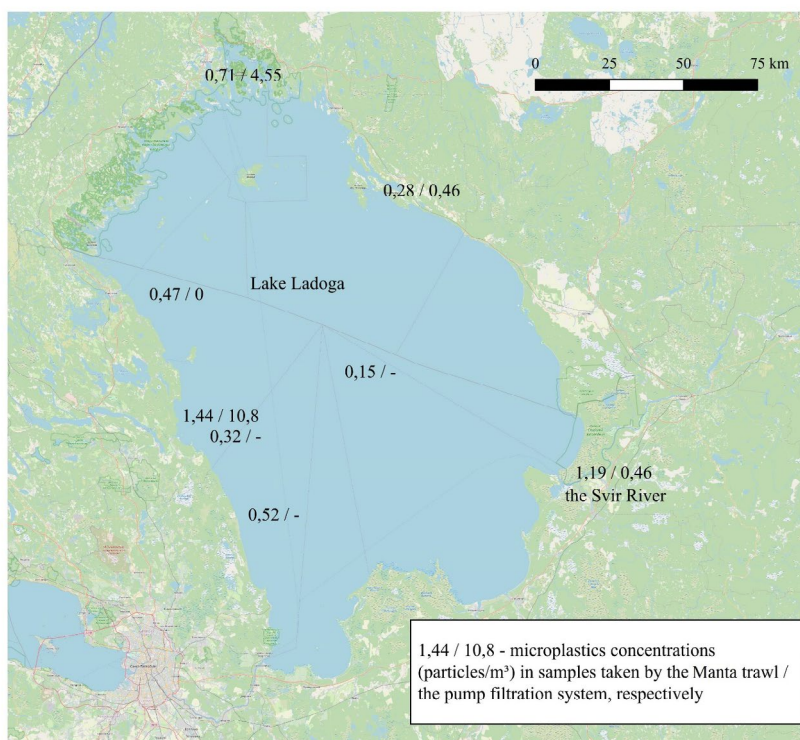


Fig.5. Average concentrations of microplastics in Lake Ladoga when sampling with the Manta trawl / the pump filtration system, respectively (particles/m³).

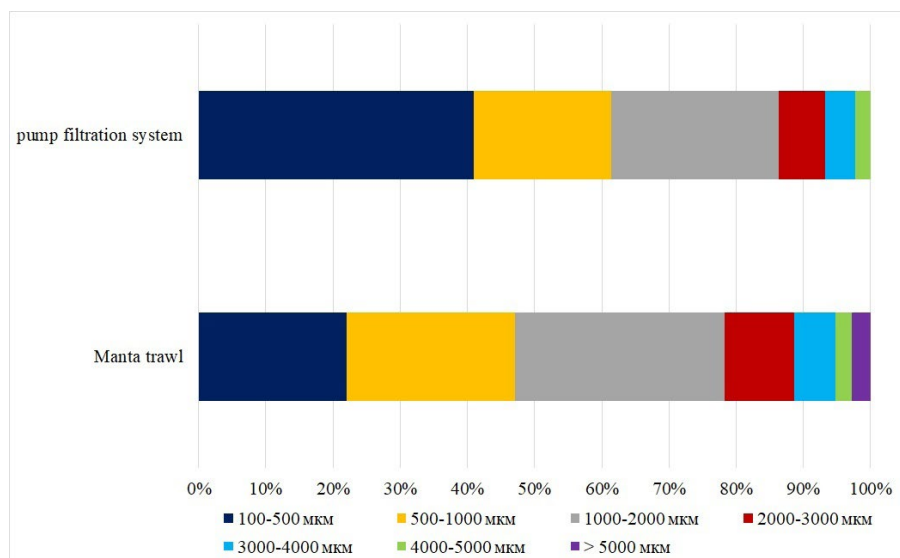


Fig.6. The percentage ratio of microplastics of different sizes.

The largest number of particles with a confirmed polymer composition were obtained for samples from Sukhodolskoye and Michurinskoye lakes, likely due to the presence of a high number of fragments collected in these lakes by the Manta trawl. Microplastic particles in the form of fibers often had strong fluorescence, while the spectra of fragments and films were determined more successfully. In Lake Sukhodolskoe, the predominant type of polymers was polypropylene (66%), as well as polyethylene (33%), polyethylene terephthalate and polystyrene were found in single copies. In Lake Michurinskoye, the predominant types of polymers were polyethylene (45%) and polypropylene (41%), and polyethylene terephthalate and polystyrene were also found. In Krasnoye Lake, only pigment spectra were determined for several particles; the material of the particles could not be determined. Among the sample particles collected in Lake Ladoga, for which the material type was determined to be a synthetic polymer, polypropylene predominated (83%), and polyethylene terephthalate were also found. In the Svir River, only particles of polyethylene terephthalate were found.

Thus, the predominant polymers among all analyzed particles were polypropylene (54%) and polyethylene (34%), which are the main types of polymers in water bodies (Dusaucy et al., 2021) and the polymers with the largest global production (PlasticsEurope, 2022).

It is assumed that particles for which only the pigment was determined can be conventionally accepted as synthetic. These particles do not have the spectrum of cellulose and they do not burn through when exposed to a laser. Fluorescence may be associated with the presence of a dye in the particles, thus making it impossible to have determined their spectrum. However, if particles do not burn out at low laser powers, they can also be conventionally accepted as synthetic.

4. Discussion

As a result of this experiment, the features of these methods were discovered. Thus, the Manta trawl is more suitable for towing on a research vessel due to

its large size, and can only be used for sampling from the surface layer of the water column. The pump filtration system can be used not only to take water samples from on board a vessel, but also from a pier or ice cover in winter. Furthermore, the pump system allows taking samples from various water layers. The volume of water that can be filtered through the Manta trawl net is significantly larger than that filtered through the pump filtration system, which allows collecting more representative samples for studies of microplastics in water. At the same time, the pump filtration system allows accurate estimating of the water volume pumped through it, and its use for sampling in areas with higher levels of pollution will facilitate further laboratory processing of samples, which was also found in (Karlsson et al., 2020). The process of sampling water using the pump filtration system is longer, but the time spent on their laboratory processing is, on the contrary, significantly less than for samples taken by a Manta trawl due to the smaller volume of organic matter retained on the filter. Thus, these two methods have their own advantages and disadvantages, are complementary, and thus the use of both methods is recommended in future studies to further evaluate which method yields the most robust data samples. The same conclusions were reached by the authors who compared these methods on the example of Lake Tollensee (Tamminga et al., 2019).

Concentrations of microplastics per 1 m³ obtained when sampling with the pump filtration system significantly exceed the concentrations of microplastics when sampling with the Manta trawl, which was also found in (Montoto-Martínez et al., 2022; Frank et al., 2024). This may be due to both the loss of particles during sampling with a Manta trawl, and, in the case of the pump filtration system, to the likelihood of overestimating the number of particles with a small sample volume. Results of (Karlsson et al., 2020; Tamminga et al., 2019) have also shown that sample volume has a significant impact on final concentrations. Thus, it is necessary to ensure that large enough samples are collected in multiple replicates to obtain a representative sample and allow for the statistical comparison of the data. In this work, the highest microplastics con-

centrations were found in Lake Michurinskoye, where the sample volume from the pump filtration system was the smallest, confirming the need for larger sample volumes (at least 1 m³). To ensure accurate sampling methods, further modifications of the system may include increasing the diameter of the receiving part on which the filters are located, which will reduce the rate of filter clogging with suspension and allow filtering a larger volume of water. However, to obtain a large sample volume using the pump filtration system, it is also necessary to take into account the seasonal characteristics of water bodies. The sampling period significantly influences the efficiency of sampling and laboratory sample processing, because the presence of a large amount of suspended matter in summer complicates the processing and further analysis of samples. In this regard, for the purpose of comparing the effectiveness of various methods without considering seasonal fluctuations and the hydrological regime of water bodies, it is recommended to take samples when there is less suspended matter in water. Therefore, the Manta trawl should be used for surface layer samples in summer or in eutrophic water bodies with high suspended matter. In such conditions, the pump filtration system is prone to clogging, making samples under 1 m³ non-representative, as seen in Lake Michurinskoye.

The difficulties that arise when determining polymers using Raman spectroscopy methods should also be noted. Difficulties may arise even at the stage of sample processing of the smallest particles, which need to be separated from organic matter (the organic medium in which the particle was located) and transferred to a separate Petri dish for subsequent analysis. Thus, it is usually possible to analyze only the largest fibers as well as fragments. In this study, determining the spectrum of fibers was much more difficult than fragments due to the frequent fluorescence of the samples. However, fibers make up the majority of microplastic particles in natural environments (Acharya et al., 2021). In this regard, the use of a Manta trawl can also ensure that fragments and films, the material of which is successfully determined by spectral methods, are included in the samples. In the samples taken by the pump filtration system, as well as in the least voluminous samples taken by the Manta trawl (Lake Ladoga and the Svir River), practically no fragments were found and the majority of detected particles were in the smallest size range, which significantly reduced the sample that can be analyzed. Furthermore, for some particles the spectra did not coincide with those available in the database, which may be due to both the degradation of the sample during use and differences in substituents for substances close in class, as well as limitations of the library itself.

5. Conclusion

A comparison was made of two methods of water sampling for microplastics using the example of Lake Ladoga and the Svir River, as well as other lakes that had not previously been studied for the content of these particles. The results showed that despite higher average concentrations of microplastics when sam-

pling with the pump filtration system, the differences between the data samples were not statistically significant. Considering the advantages and disadvantages of both methods, at this time it cannot be concluded that one of them is more suitable for studying microplastics in water bodies, thus calling for additional research comparing the two methods of sample collection. These methods are complementary and should be used taking into account scientific objectives. The Manta trawl is more suitable for collecting a large volume of water from the surface layer in a short time. The pump filtration system is suitable for sampling from different water layers as well as in the surface layer in conditions of a small content of suspended matter. To compare data obtained by different methods, it is necessary to ensure the sampling of a large volume of water, which in the case of the pump filtration system, is only possible when the content of phytoplankton and water turbidity are minimal.

Acknowledgements

This study was carried out under Governmental Order to St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (subject no. FFZF-2024-0002 “Modern threats to water bodies and innovative methods for their conservation, restoration, and rational use”). The Manta trawl was purchased with the support of the Gennady Komissarov Foundation for Support of Young Scientists. The research was carried out using the equipment of the resource centers “Geomodel” and “Centre for Diagnostics of Functional Materials for Medicine, Pharmacology and Nanoelectronics” at the St. Petersburg State University Science Park. The authors thank Artem E. Lapenkov, junior researcher of the Institute of Limnology RAS - SPC RAS, for assistance with sampling in small lakes, and Ryan A. Todoroff, MA, Detroit, Michigan, USA for proofreading the article in English.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Acharya S., Rumi S.S., Hu Y. et al. 2021. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review. *Textile Research Journal* 91 (17-18): 2136-2156. DOI: [10.1177/0040517521991244](https://doi.org/10.1177/0040517521991244)
- Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L. et al. 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. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.04.185](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185)
- Campanale C., Savino I., Pojar I. et al. 2020. A Practical Overview of Methodologies for Sampling and Analysis of Microplastics in Riverine Environments. *Sustainability* 12(17): 6755. DOI: [10.3390/su12176755](https://doi.org/10.3390/su12176755)
- Choy C.A., Robison B.H., Gagne T.O. et al. 2019. The vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column. *Scientific Reports* 9: 7843. DOI: [10.1038/s41598-019-44117-2](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44117-2)

- Dai Z., Zhang H., Zhou Q. et al. 2018. Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities. *Environmental Pollution* 242: 1557-1565. DOI: [10.1016/j.envpol.2018.07.131](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.131)
- Dris R., Gasperi J., Rocher V. et al. 2018. Synthetic and non-synthetic anthropogenic fibers in a river under the impact of Paris Megacity: sampling methodological aspects and flux estimations. *Science of The Total Environment* 618: 157-164. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.009)
- Du R., Sun X., Lin H. et al. 2022. Assessment of Manta trawling and two newly-developed surface water microplastic monitoring techniques in the open sea. *Science of The Total Environment* 842: 156803. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.156803](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156803)
- Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y. et al. 2021. Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environmental Pollution* 284: 117075. DOI: [10.1016/j.envpol.2021.117075](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117075)
- Egger M., Sulu-Gambari F., Lebreton L. 2020. First evidence of plastic fallout from the north pacific garbage patch. *Scientific Reports* 10: 7495. DOI: [10.1038/s41598-020-64465-8](https://doi.org/10.1038/s41598-020-64465-8)
- Eo S., Hong S.H., Song Y.K. et al. 2019. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea. *Water Research* 160: 228-237. DOI: [10.1016/j.watres.2019.05.053](https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053)
- Ershova A.A., Eremina T.R., Dunayev A.L. et al. 2021. Study of microplastic pollution in the seas of the Russian Arctic and the Far East. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]* 11(2): 164-177. DOI: [10.25283/2223-4594-2021-2-164-177](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-164-177) (in Russian)
- Frank Y.A., Ershova A.A., Vorobiev E.D. et al. 2024. Comparability of riverine microplastic sampling and processing techniques: intercalibration experiment for the Yenisei River. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry* 34: 89–105. DOI: [10.17223/24135542/34/8](https://doi.org/10.17223/24135542/34/8)
- Frank Y.A., Vorobiev D.S., Kayler O.A. et al. 2021. Evidence for Microplastics Contamination of the Remote Tributary of the Yenisei River, Siberia—The Pilot Study Results. *Water* 13(22): 3248. DOI: [10.3390/w13223248](https://doi.org/10.3390/w13223248)
- Hale R.C., Seeley M.E., La Guardia M.J. et al. 2020. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research - Oceans* 125(1): 1-40. DOI: [10.1029/2018JC014719](https://doi.org/10.1029/2018JC014719)
- Il'ina O.V., Kolobov M.Y., Il'inskii V.V. 2021. Plastic Pollution of the Coastal Surface Water in the Middle and Southern Baikal. *Water Resources* 48: 56–64. DOI: [10.1134/S00097807821010188](https://doi.org/10.1134/S00097807821010188)
- Ivanova E.V., Tikhonova D.A. 2022. Estimation of microplastic content in Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN [Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences]* 6: 58-67. DOI: [10.17076/lim1582](https://doi.org/10.17076/lim1582) (in Russian)
- Karlsson T.M., Kärrman A., Rotander A. et al. 2020. Comparison between Manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters. *Environmental science and pollution research* 27: 5559-5571. DOI: [10.1007/s11356-019-07274-5](https://doi.org/10.1007/s11356-019-07274-5)
- Kooi M., Reisser J., Slat B. et al. 2016. The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean. *Scientific Reports* 6: 33882. DOI: [10.1038/srep33882](https://doi.org/10.1038/srep33882)
- Lake Ladoga and the coastal remarkable sight The Atlas ts.. 2015. In: Rummyantsev V.A. (Ed.). St. Petersburg: Nestor-Historia. (in Russian)
- Lenaker P.L., Baldwin A.K., Corsi S.R. et al. 2019. Vertical distribution of microplastics in the water column and surficial sediment from the Milwaukee River basin to Lake Michigan. *Environmental Science & Technology* 53: 12227-12237. DOI: [10.1021/acs.est.9b03850](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03850)
- Leusch F.D., Lu H.C., Perera K. et al. 2023. Analysis of the literature shows a remarkably consistent relationship between size and abundance of microplastics across different environmental matrices. *Environmental Pollution* 319: 120984. DOI: [10.1016/j.envpol.2022.120984](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120984)
- Leusch F.D.L., Ziajahromi S. 2021. Converting mg/L to Particles/L: Reconciling the Occurrence and Toxicity Literature on Microplastics. *Environmental Science & Technology* 55(17): 11470-11472. DOI: [10.1021/acs.est.1c04093](https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04093)
- Liedermann M., Gmeiner P., Pessenlehner S. et al. 2018. A methodology for measuring microplastic transport in large or medium rivers. *Water* 10(4): 414. DOI: [10.3390/w10040414](https://doi.org/10.3390/w10040414)
- Lindeque P.K., Cole M., Coppock R.L. et al. 2020. Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. *Environmental Pollution* 265: 114721. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114721](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721)
- Montoto-Martínez T., Meléndez-Díez C., Melián-Ramírez A. et al. 2022. Comparison between the traditional Manta net and an innovative device for microplastic sampling in surface marine waters. *Marine Pollution Bulletin* 185(A): 114237. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2022.114237](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114237)
- Pasquier G., Doyen P., Kazour M. et al. 2022. Manta Net: The Golden Method for Sampling Surface Water Microplastics in Aquatic Environments. *Frontiers in Environmental Science* 10: 811112. DOI: [10.3389/fenvs.2022.811112](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.811112)
- Plastics EuroPlastics pe. - the Facts 2022. 2022. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/> (accessed 22 May 2024).
- Pozdnyakov Sh.R., Karetnikov S.G., Ivanova E.V. et al. 2021. Experience of using a filtration device for studying vertical distribution of microplastics in water column. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]* 4(28): 41-45. DOI: [10.24852/2411-7374.2021.4.41.45](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.4.41.45) (in Russian)
- Reisser J., Slat B., Noble K. et al. 2015. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. *Biogeosciences* 12(4): 1249. DOI: [10.5194/bg-12-1249-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-1249-2015)
- Rezolyuciya I Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem po zagryazneniyu okruzhayushchej sredy mikroplastikom «MicroPlasticsEnvironment-2022» [Resolution of the 1st All-Russian Conference with international participation on environmental pollution with microplastics «MicroPlasticsEnvironment-2022»]. 2022. URL: http://microplasticsiberia.com/wp-content/uploads/2022/08/Резолюция МРЕ-2022_fin.pdf (accessed 22 May 2024). (in Russian)
- Simon M., van Alst N., Vollertsen J. 2018. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research* 142: 1-9. DOI: [10.1016/j.watres.2018.05.019](https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.019)
- Song Y.K., Hong S.H., Eo S. et al. 2018. Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters. *Environmental Science & Technology* 52: 12188-12197. DOI: [10.1021/acs.est.8b04032](https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04032)
- Statistics Kingdom. 2017. URL: <https://www.statskingdom.com/index.html> (accessed 22 May 2024)
- Tammenga M., Fischer E.K. 2020. Microplastics in a deep, dimictic lake of the North German Plain with special regard to vertical distribution patterns. *Environmental Pollution* 267: 115507. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115507](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115507)
- Tammenga M., Stoewer S.-C., Fischer E.K. 2019. On the representativeness of pump water samples versus Manta sampling in microplastic analysis. *Environmental pollution* 254: 112970. DOI: [10.1016/j.envpol.2019.112970](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112970)

Tikhonova D.A., Karetnikov S.G., Ivanova E.V. et al. 2024. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resources* 51: 146-153. DOI: [10.1134/S009780782370063X](https://doi.org/10.1134/S009780782370063X)

Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubinc A.Y. et al. 2019. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 138: 193-205. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2018.11.047](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.047)

Сравнение эффективности двух методов отбора проб воды для изучения содержания микропластика в водных объектах

Тихонова Д.А.^{1,2*}, Шалунова Е.П.², Каретников С.Г.¹

¹ Институт озераедения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ул. Севастьянова, д. 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

АННОТАЦИЯ. В связи с отсутствием единой методики отбора проб на микропластик существуют трудности при сравнении полученных результатов при отборе разными методами. Было проведено сравнение насосной фильтровальной системы и сети Манта для оценки их эффективности и применимости при отборе проб воды на содержание микропластика на примере Ладожского озера, реки Свирь и малых озер Ленинградской области (Суходольское, Мичуриновское, Красное). Результаты показали, что несмотря на более высокие средние концентрации микропластика при отборе проб насосной системой ($8,5 \pm 11,5$ частиц/м³) по сравнению с сетью Манта ($0,7 \pm 0,5$ частиц/м³), результаты сопоставимы. Методы имеют противоположные достоинства и недостатки и являются комплементарными. Сеть Манта больше подходит для отбора большого объема воды с поверхностного слоя в краткие сроки и в периоды с большим содержанием взвеси, в то время как насосная фильтровальная система подходит для отбора проб на разных горизонтах и в поверхностном слое при небольшом объеме взвеси и позволяет более точно оценить объем пробы. Необходимо обеспечить отбор большого объема воды, что в случае с насосной фильтровальной системой представляется возможным только в период, когда содержание планктона и мутность воды минимальны.

Ключевые слова: микропластик, отбор проб воды, сеть Манта, насосная фильтровальная система, загрязнение микропластиком

Для цитирования: Тихонова Д.А., Шалунова Е.П., Каретников С.Г. Сравнение эффективности двух методов отбора проб воды для изучения содержания микропластика в водных объектах // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - С. 1434-1453. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1434

1. Введение

В настоящее время не существует единой универсальной методики анализа частиц микропластика в водной среде. В исследованиях, проводимых разными научными группами, отличаются методы отбора проб и их лабораторного анализа, размеры исследуемых частиц и используемые единицы измерения. В связи с этим возникают проблемы методического характера и сложности при сравнении полученных данных с результатами других исследований.

В мировой практике для отбора проб воды на микропластик в основном используются как насосные системы (Song et al., 2018; Choy et al., 2019;

Eo et al., 2019; Zobkov et al., 2019; Tamminga and Fischer, 2020; Ершова и др., 2021), так и буксирные сети (Reisser et al., 2015; Kooi et al., 2016; Dris et al., 2018; Liedermann et al., 2018; Lenaker et al., 2019; Egger et al., 2020; Frank et al., 2021; P'ina et al., 2021). Насосные системы можно использовать для отбора как с поверхностного слоя водной толщи, так и с других водных горизонтов (Tikhonova et al., 2024), в то время как сети чаще используют для отбора проб именно в поверхностном слое водоема (Campanale et al., 2020; Pasquier et al., 2022) и реже на других горизонтах (Kooi et al., 2016; Liedermann et al., 2018; Lenaker et al., 2019; Egger et al., 2020). Среди сетей наиболее часто используемыми для отбора микропластика являются сети Манта (Karlsson et al., 2020;

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: tdasha94@mail.ru (Д.А. Тихонова)

Поступила: 25 июня 2024; **Принята:** 01 ноября 2024;

Опубликована online: 25 декабря 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Pasquier et al., 2022). Реже используются другие пробоотборники, например батометр Нискина (Bagaev et al., 2017) или кассетный пробоотборник (Dai et al., 2018).

Данные методы имеют свои особенности: так, площадь фильтрования у сети Манта значительно больше, что позволяет отфильтровать большой объем воды за малый промежуток времени, а также чаще задерживать крупные частицы, которые реже встречаются в водной толще (Tamminga et al., 2019; Karlsson et al., 2020), однако существует высокая вероятность потерь частиц и внешнего загрязнения при смыве пробы с сетки. В то же время у сетей Манта, нейстонных и других сетей размер ячеей часто ≥ 300 мкм (Dusaucy et al., 2021). Использование сетей с крупным размером ячеей может приводить к потерям более мелких частиц, которые преобладают в водных объектах (Lindeque et al., 2020). Использование сетей с размером ячеей < 100 мкм (Dris et al., 2018; Song et al., 2018) увеличивает диапазон размеров полученных частиц и приводит к более точной оценке содержания микропластика в воде. Насосные системы, в свою очередь, позволяют точнее оценить объем профильтрованной воды и избежать потерь и внешнего загрязнения, но объем пробы будет значительно меньше из-за относительно небольшой площади сетки и ее быстрого забивания взвесью, а также потребуется значительно больше времени для отбора значимого объема пробы (1 м³). Батометры минимизируют вероятность внешнего загрязнения, однако существенно лимитируют объем отобранной пробы. Меньший объем профильтрованной воды может приводить к переучету содержания частиц микропластика, поэтому рекомендуется отбирать как можно больший объем воды для получения более точных результатов. На данный момент отсутствуют конкретные рекомендации по минимальному объему проб, однако это обсуждается в научном сообществе. Например, в Резолюции Первой Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment – 2022» (Резолюция..., 2022) минимальный предложенный объем пробы составляет 1 м³. Однако это не всегда представляется возможным также и для насосных систем в связи с забиванием сетки планктоном и взвесью.

Существует довольно мало работ, посвященных сравнению насосных систем и траллируемых сетей типа Манта, являющихся основными методами, используемыми для отбора проб воды при исследовании микропластика в водоемах (Tamminga et al., 2019; Karlsson et al., 2020; Du et al., 2022; Montoto-Martínez et al., 2022; Frank et al., 2024). Научные группы не всегда приходят к однозначным выводам о том, какой метод является наиболее применимым для данных целей: так, в работах Tamminga et al. (2019) и Frank et al. (2024) утверждается, что два этих метода являются не взаимозаменяемыми, а комплементарными в связи с их различиями.

Целью данной работы было сравнение двух разных методов отбора проб воды для определения содержания микропластика – насосной фильтровальной системы и буксируемой сети Манта для сравнения их удобства, эффективности и применимости к исследуемым водным объектам, а также оценка характеристик микропластика в пробах, отобранных данными методами в нескольких водных объектах.

2. Материалы и методы

Для исследования было выбрано Ладожское озеро, а также его приток река Свирь и три малых озера Ленинградской области - Суходольское, Мичуринское и Красное. Ладожское озеро и его притоки исследуются на содержание микропластика с 2018 года (Иванова и Тихонова, 2022), а вот малые озера Приозерского района (Суходольское, Красное и Мичуринское) ранее исследованы не были. 85% речного стока в Ладожское озеро приходится на долю 3 главных притоков – рек Свирь, Волхов и Бурная (Вуокса) (Ладожское озеро..., 2015). Суходольское озеро является истоком реки Бурной, впадающей в Ладожское озеро и являющейся одним из основных притоков Ладоги вместе с рекой Свирь, в связи с чем изучение содержания в нем микропластика может быть полезно для понимания количества микропластика, попадающего в озеро со стоком рек. Красное и Мичуринские озера были выбраны по их близкому географическому положению (Рис. 1).

Для отбора проб воды использовалась специальная насосная фильтровальная система (Рис. 2), позволяющая отбирать пробы воды с различных водных горизонтов. Данная система была разработана в ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН в 2019 г. одним из авторов данной статьи Каретниковым С.Г.

Основу конструкции составлял бытовой погружной насос с нижним водозабором мощностью 300 Вт. Насосы данного типа можно опускать на глубину не более 10 м. Опускать глубже не позволяет длина электрического кабеля, кроме того, при повышении внешнего давления перестает функционировать клапан, перекрывающий обратный ток воды в насосе. В связи с этим, для создания непрерывности потока насос размещался в поверхностном слое воды. В зависимости от необходимого горизонта для отбора проб воды можно использовать набор шлангов различной длины, легко соединяемых друг с другом коннекторами. На нижней части насоса находился герметичный переходник из эластичной трубки от водозаборной части насоса к шлангу, на конце которого находилась установка с фильтр-сеткой с размером ячеей 100 мкм, все соединения закреплялись резьбовыми хомутами. Вода заполняла шланг под действием гидростатического давления, а насос откачивал воду из верхней части шланга. Измерение объема прокачанной через фильтры воды осуществлялось с помощью бытового счетчика воды, размещенного на выходе из насоса. Уменьшение скорости прокачивания воды через

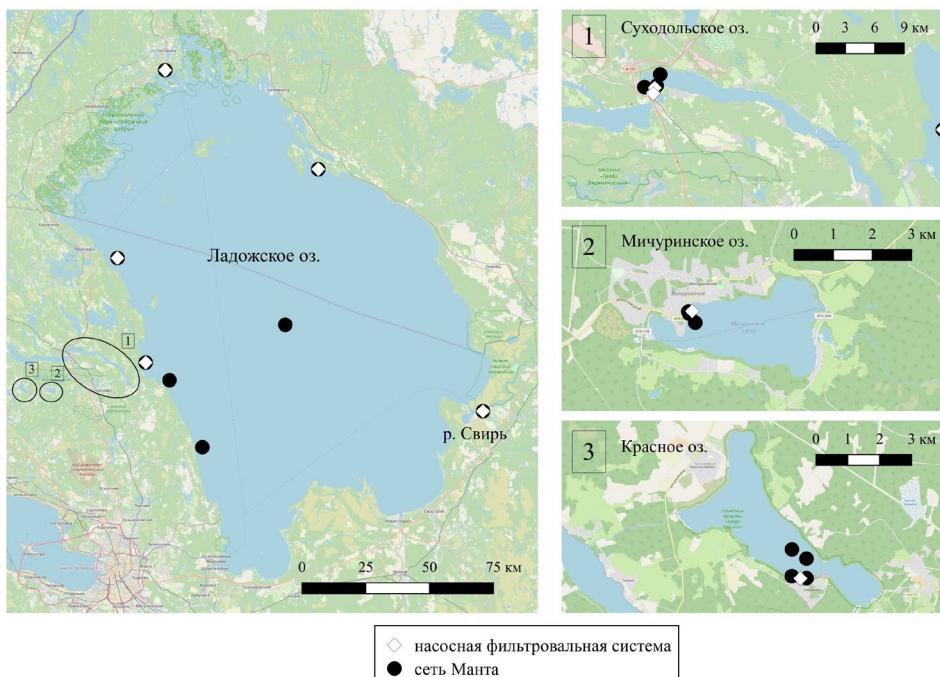


Рис.1. Точки отбора проб в Ладожском, Суходольском, Мичуринском и Красном озерах.

фильтр свидетельствовало о забивании сетки взвесью и необходимости ее замены. Чтобы содержимое сеток не вымывалось при их подъеме, в месте соединения шланга с фильтровальной системой устанавливался клапан, пропускающий воду только в одном направлении.

Пробы отбирали в поверхностном слое водного объекта с борта научно-исследовательского судна «Эколог» либо с борта лодки с использованием электрогенератора. Когда объем прокачиваемой через сетку воды в единицу времени значительно уменьшался, фильтрование останавливалось, сетка вынималась из фильтровальной системы и помещалась в емкость с дистиллированной водой, а на ее место помещалась новая сетка 100 мкм. При малом объеме пробы в одной точке (до 500 литров) делалось несколько повторностей.

Для сравнения пробы в поверхностном слое были также отобраны сетью типа Манта (Рис. 3). Размеры рамы на входе – 600x257 мм, в месте крепления сетки – 600x154 мм (площадь 924 см²). К раме прикреплялась сеть размером 2000x600 мм, периметром 1508 мм. Размер ячеей сети составил 100 мкм. Пробоотборник-конус с таким же размером ячейи прикреплялся снизу сетки с помощью фановой трубы и резьбового хомута.

Перед фильтрованием сеть Манта промывалась в водоеме без пробоотборника. Далее пробоотборник прикреплялся к сетке, сетка опускалась в воду и буксировалась за лодкой или научно-исследовательским судном на малой скорости в течение определенного времени. Отбор проб в озерах Суходольское, Мичуринское и Красное проводился с надувной моторной лодки, при этом выбор времени траления обуславливался визуально оцененным количеством взвеси в воде. Тросы сетки прикреплялись к борту лодки и далее лодка шла в течение 10-25 минут на средней скорости 1-3 км/ч.

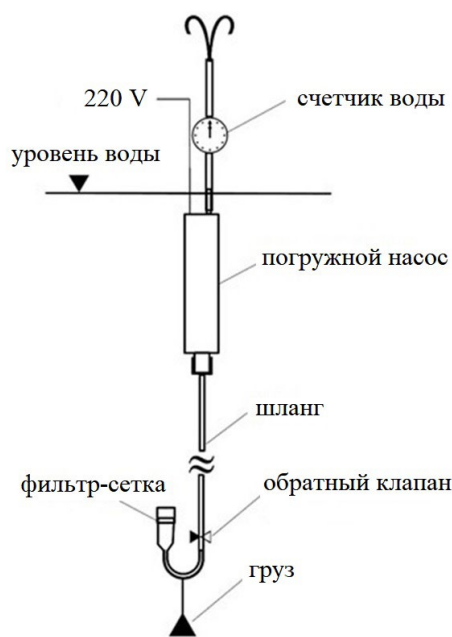


Рис.2. Насосная фильтровальная система, разработанная и используемая ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН с 2019 г. (Поздняков и др., 2021).

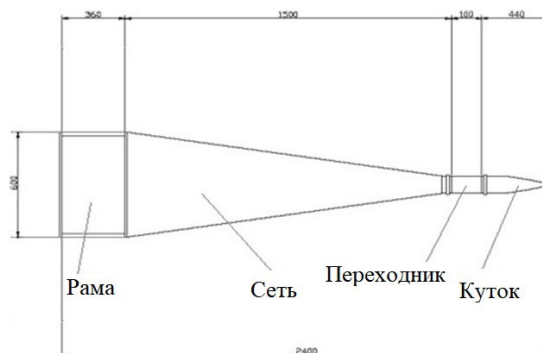


Рис.3. Схема сети Манта (мм).

В Ладожском озере отбор проб проходил с борта научно-исследовательского судна «Эколог» во время его торможения: при падении скорости судна сетка опускалась в воду при помощи крана и буксировалась до его остановки в среднем 3-5 минут со средней скоростью 3,4-4 км/ч. При помощи GPS-навигатора фиксировался трек, время и средняя скорость траления. Далее сетка поднималась из воды на кране и над водой промывалась с борта судна при помощи шланга и забортной воды, после чего поднималась на борт и с нее снимался пробоотборник с отфильтрованным материалом, который смывался дистиллированной водой в емкость. Объем пробы рассчитывался с учетом площади рамы в месте крепления сетки (924 см²) и средней скорости траления. До этапа лабораторного анализа пробы хранились в холодильнике.

Пробы были отобраны в августе 2023 г. Всего нейстонной сетью типа Манта было отобрано 19 проб, фильтровальной системой – 21 проба. В Суходольском, Мичуринском, Красном озерах каждым методом было отобрано от 3 до 5 точечных проб, а в реке Свирь по 2 пробы. Так как в упомянутых выше водных объектах точечные пробы отобраны в течение 1-2-х дней и в одном районе, то они объединены в составные пробы для каждого водного объекта соответственно. В Ладожском озере было отобрано по 1 пробе сетью Манта в 7 разных точках и по 2 пробы фильтровальной системой в 4 разных точках, находящихся на значительном удалении друг от друга, в связи с чем полученные результаты рассматриваются как отдельные точечные пробы. Для получения референсных значений и сравнения полученных данных между собой, концентрации и объем проб для Ладожского озера представлены в виде диапазона полученных значений и как среднее арифметическое между полученными концентрациями. Объем воды в точечных пробах, отобранных сетью Манта составлял от 9,7 до 120 м³, в пробах, отобранных насосной фильтровальной системой, – от 0,04 до 1,1 м³. Суммарный объем профильтрованной воды в пробах, отобранных разными методами приведен в Таблице 1. Значительная разница в объеме воды при использовании разных методов объясняется упомянутыми выше особенностями обеих конструкций, а также значительным объемом взвеси в воде в отбираемый сезон.

Лабораторная обработка проб включала в себя растворение органического материала при помощи реактива Фентона (30% перекись водорода + Fe(II)-катализатор). Пробы, отобранные сетью

Манта, содержали очень много органического материала, в связи с чем их обработка и последующий анализ были значительно более трудо- и времязатратны по сравнению с пробами, отобранными фильтровальной системой. Пробы, отобранные сетью Манта, фильтровались через сетку 100 мкм и все крупные фрагменты (листья, водная растительность, насекомые и др.) тщательно промывались дистиллированной водой на ту же сетку и удалялись. Весь отфильтрованный материал переносился в термостакан, куда добавлялась перекись водорода вместе с Fe(II)-катализатором (объем добавленного реактива зависел от объема органического материала). При обработке проб, отобранных фильтровальной системой, осажденный материал с сетки смывался в термостакан с аналогичным реактивом. Далее проба выдерживалась при температуре 75°C на песчаной бане минимум в течение часа. Далее в пробу повторно добавлялась перекись водорода и процесс продолжался до максимально возможного удаления органического материала. Для проб, отобранных сетью Манта, процесс повторялся до 4-5 раз. После растворения органики оставшийся в стакане материал оставлялся на сутки, после чего фильтровался через сетку 100 мкм и смывался дистиллированной водой на чашки Петри (от 1 до 8 чашек на 1 пробу в зависимости от объема нерастворившегося органического материала). Далее чашки Петри накрывались сеткой 100 мкм и оставлялись до полного высыхания.

Для контроля побочного загрязнения параллельно с реальными пробами обрабатывались холостые пробы с дистиллированной водой. Во время всех этапов лабораторной обработки реальных проб холостые пробы стояли рядом открытыми, после чего обрабатывались аналогичным образом (выдерживание с реактивом Фентона, фильтрование, смыв на чашку Петри). Все этапы лабораторной обработки проб проводились в вытяжном шкафу, использовался хлопковый халат, а вся посуда и фильтр-сетки промывались дистиллированной водой непосредственно перед их использованием.

После высыхания материала чашки Петри анализировались под микроскопом. Предварительная идентификация микропластика проводилась визуальными методами: отбирались частицы с отсутствием клеточной структуры, с единообразной толщиной и цветные. Частицы, предварительно идентифицированные как мезопластик (больше 5 мм), микропластик (меньше 5 мм) или материал антропогенного происхождения подсчитывались и

Таблица 1. Объем воды, полученный при отборе сетью Манта и насосной фильтровальной системой.

Водный объект	Объем воды, сеть Манта	Объем воды, насосная фильтровальная система
Суходольское озеро	300,7 м ³	1,1 м ³
Мичуринское озеро	96,8 м ³	0,173 м ³
Красное озеро	135,6 м ³	1,2 м ³
Река Свирь	20,1 м ³	2,16 м ³
Ладожское озеро*	от 9,7 до 28,4 м ³	от 0,5 до 2,2 м ³

Примечание: *Для Ладожского озера приведен диапазон объемов точечных проб, отобранных разными методами.

фотографировались, записывался их размер, форма (волокна, фрагменты, пленки) и цвет. Далее наиболее крупные (видимые глазу) и наименее агрегированные с органическим материалом частицы иголкой переносились в отдельную чашку Петри для последующего анализа химического состава частиц спектральными методами.

Анализ химического состава выборки обнаруженных частиц микропластика методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановской спектроскопии) в геометрии обратного рассеяния света на спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800 был проведен на базе Научного Парка СПбГУ (ресурсный центр «Геомодель»). Интерпретация проводилась на основании сравнения с имеющимися спектрами в базе данных Horiba JY Raman Library FORENSIC V2.

Для определения массы микропластика длина и ширина частиц измерялись при помощи оптического микроскопа. Для определения массы волокон допускалось, что они цилиндрической формы по аналогии с другими исследованиями (Simon et al., 2018, Leusch and Ziajahromi, 2021). Ширина волокон принималась за диаметр цилиндра. Далее вычислялся объем частицы, который умножался на плотность наиболее часто встречаемых полимеров в окружающей среде (полипропилена и полиэтилена) – 0,93 г/см³.

Фрагменты и пленки принимались за параллелепипед. Наибольшие длина и ширина фрагментов рассчитывались при помощи оптического микроскопа. При невозможности измерить под микроскопом третье наименьшее измерение, у пленок за него принималось 30 мкм, а у фрагментов 50 мкм, т.к. все фрагменты были относительно плоскими. Часть наиболее крупных частиц была взвешена на аналитических весах Mettler ToledoXP205 (цена деления - 0,01 мг, среднеквадратичная ошибка измерения не более 0,03 мг) на базе Научного Парка СПбГУ (ресурсный центр «Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и наноэлектроники») для сравнения расчетного и реального веса фрагментов. В случаях, когда масса фрагмента оказывалась менее порога чувствительности весов, частицы взвешивались выборкой в количестве 20 штук, а масса каждого фрагмента высчитывалась как 1/20 от общей массы выборки.

Диаграммы и графики были построены в программе Microsoft Excel 2019. Для создания карты точек отбора проб использовалась программа QGIS 3.14.15. При статистическом анализе характер распределения данных был проверен при помощи критерия Шапиро-Уилка. Далее равенство выборок данных точечных проб при отборе сетью Манта и при отборе насосной фильтровальной системой анализировалось при помощи U-критерия Манна-Уитни. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена был использован для оценки отношений между объемом пробы и концентрацией микропластика. Расчеты проводились при помощи веб-сайта Statistics Kingdom (Statistics Kingdom, 2017) и программы Microsoft Excel 2019.

3. Результаты

В холостых пробах было обнаружено от 0 до 5 волокон, визуально похожих на микропластик. Среднее количество волокон в холостых пробах – 1. Количество данных частиц в холостой пробе вычиталось из количества частиц, обнаруженных в реальной пробе.

Средняя концентрация микропластика в исследованных водных объектах при отборе проб сетью Манта составила $0,7 \pm 0,5$ частиц/м³ (медиана 0,6 частиц/м³), а при отборе фильтровальной системой – $8,5 \pm 11,5$ частиц/м³ (медиана 4,1 частиц/м³). Количество частиц, обнаруженных в пробе, а также количественные (частицы, м³) и расчетные массовые концентрации (мг/м³) для каждого водного объекта представлены в Таблице 2.

Наибольшие концентрации микропластика были обнаружены в Мичуринском озере при отборе обоими методами, что вероятно связано с тем, что место отбора проб находилось возле автомобильной трассы и пляж активно используется в рекреационных целях. Однако значительные концентрации, полученные при отборе фильтровальной системой, вероятнее всего объясняются малым суммарным объемом пробы в связи с большим количеством взвеси. Наименьшие концентрации наблюдаются в Красном озере, где пробы отбирались вдали от урбанизированных территорий, а также в Ладожском озере, за исключением устья реки Бурной. Сравнение количественных концентраций, полученных сетью Манта и фильтровальной системой, приведено на Рис. 4.

В Ладожском озере, где пробы были отобраны в разных точках, наибольшие концентрации микропластика получены в устье реки Бурной, являющейся одним из основных притоков озера (1,4 частицы/м³ для проб, отобранных сетью Манта, 10,8 частиц/м³ в пробах, отобранных фильтровальной системой). В реке Свирь, тоже являющейся основным притоком Ладоги, концентрации микропластика при отборе проб сетью Манта также оказались выше, чем в других точках отбора (Рис. 5).

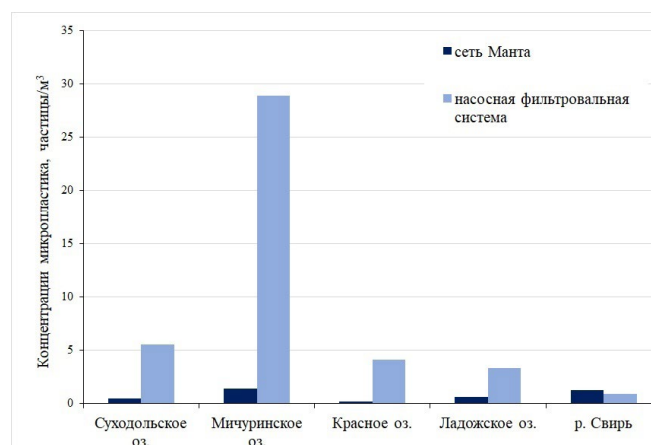


Рис. 4. Численные концентрации микропластика при отборе разными методами.

Таблица 2. Численные и массовые концентрации частиц микропластика в разных водных объектах.

Водный объект	Кол-во частиц (сеть Манта) после вычета побочного загрязнения		Концентрация*, частицы/м ³ (сеть Манта)	Масса частиц, мг/м ³ (сеть Манта)		Кол-во частиц (насосная фильтровальная система) после вычета побочного загрязнения		Концентрация*, частицы/м ³ (насосная фильтровальная система)	Масса частиц, мг/м ³ (насосная фильтровальная система)	
	волокна	фрагменты		волокна	фрагменты	волокна	фрагменты		волокна	фрагменты
Суходольское озеро	128		0,4	0,004		6		5,5	0,009	
	109	19		0,0001	0,004	5	1		0,003	0,006
Мичуринское озеро	136		1,4	0,1		5		28,9	0,004	
	100	36		0,001	0,1	4	1		0,002	0,002
Красное озеро	21		0,15	0,0004		5		4,1	0,009	
	17	4		0,0001	0,0003	4	1		0,002	0,007
Река Свирь	24		1,2	0,0003		2		0,9	0,00008	
	24	-		0,0003	-	2	-		0,00008	-
Ладожское озеро	93		0,6**	0,001		11		3,3**	0,002	
	88	5		0,0002	0,0008	11	-		0,002	-

Примечание: *концентрация рассчитана как отношение суммы частиц, обнаруженных в объединенной (составной) пробе, к суммарному объему воды составной пробы

**для Ладожского озера концентрация рассчитана как среднее арифметическое между концентрациями частиц в точечных пробах, отобранных в разных локациях ввиду существенной пространственной неоднородности данного водного объекта.

Отсутствует значимая корреляция между объемом отобранной точечной пробы и концентрацией микропластика (Коэффициент корреляции Спирмена, $r = 0,2$). Тест Шапиро-Уилка показал, что распределение данных не является нормальным ($W(19) = 0,9$, $p = 0,042$ для данных, полученных сетью Манта, $W(21) = 0,52$, $p < 0,001$ для данных, полученных насосной фильтровальной системой). U-тест Манна-Уитни показал отсутствие статистически значимых различий между выборками, соответствующими количеству микропластика, рас-

считанному в точечных пробах при отборе сетью Манта, и количеству, полученному при отборе фильтровальной системой ($p = 0,5$).

На аналитических весах было взвешено 26 частиц (фрагментов и пленок). Средний вес наиболее мелких и легких фрагментов (около 1 мм) составил 0,03 мг. Наиболее крупные фрагменты (несколько мм) – от 0,11 до 0,61 мг. При сравнении реального и расчетного веса частиц установлено, что они находятся в пределах одного порядка и разница между выборками не существенна ($p = 0,7$).

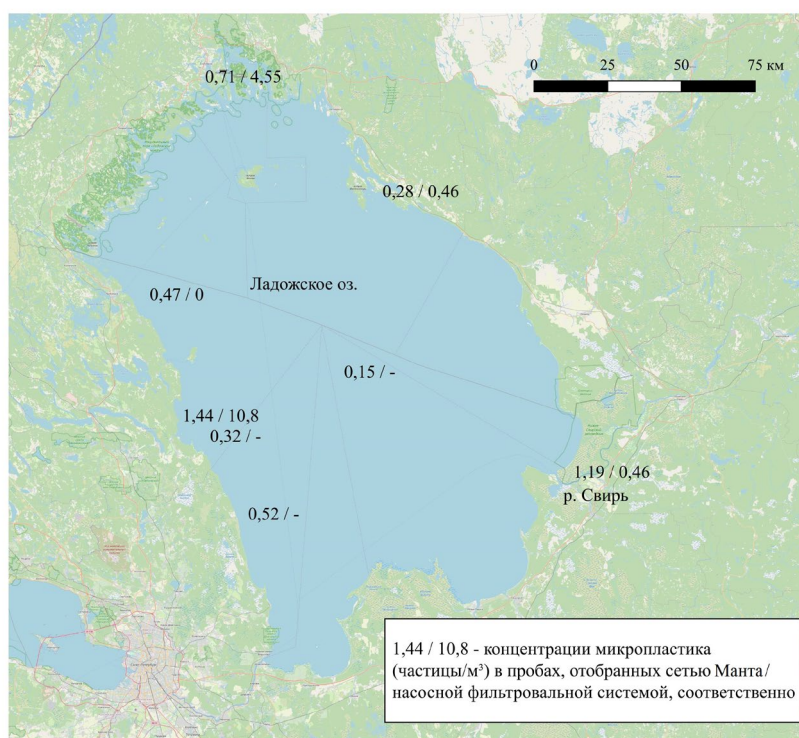


Рис.5. Средние концентрации микропластика при отборе проб сетью Манта / при отборе проб насосной фильтровальной системой (частиц/м³) в разных точках отбора.

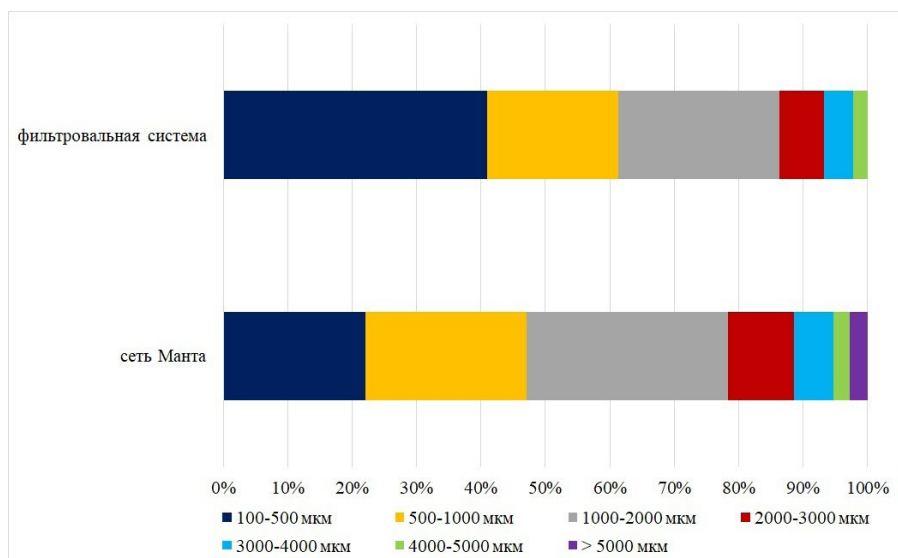


Рис.6. Процентное соотношение размеров обнаруженных частиц микропластика.

По длине наибольшего измерения большинство частиц при использовании обоих методов находится в диапазоне 100-1000 мкм (47%). Данный диапазон был так же разделен на два: 100-500 мкм и 500-1000 мкм для оценки доли микропластика наименьшего размера. При отборе проб сетью Манты количество частиц в диапазонах 100-500 мкм и 500-1000 мкм имели примерно одинаковые доли (22% и 25%, соответственно), однако при отборе проб фильтровальной системой среди всех частиц микропластика преобладали именно наименьшие - 100-500 мкм (41%) (Рис. 6). В то же время частицы мезопластика (больше 5 мм) встречались только при отборе сетью Манты. Количество частиц уменьшается с увеличением их размера, что соответствует нашим предыдущим исследованиям (Tikhonova et al., 2024) и другим работам (Hale et al., 2020, Leusch et al., 2023).

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния была проверена выборка из 106 частиц, из них у 44 частиц удалось получить достоверные спектры полимеров. У 23 частиц были определены только спектры различных красителей. 22 частицы сильно флуоресцировали, что также затруднило определение их спектра. У 17 частиц не удалось определить спектр из-за несовпадения с референсными значениями в базе данных или сильного загрязнения образца.

Наибольшее количество образцов с подтвержденным полимерным составом удалось получить для проб из Суходольского и Мичуринского озер. Это связано с наличием большого количества фрагментов в пробах, отобранных в этих озерах сетью Манты. Частицы микропластика в форме волокон часто сильно флуоресцировали, в то время как спектры фрагментов и пленок определялись более успешно. В Суходольском озере преобладающим типом полимеров является полипропилен (66%), а также полиэтилен (33%), полиэтилентерефталат и полистирол встречались в единичных экземплярах. В Мичуринском озере преобладающими типами полимеров являются полиэтилен (45%) и

полипропилен (41%), также встречаются полиэтилентерефталат и полистирол. В Красном озере для нескольких частиц были определены спектры пигментов, материал частиц определить не удалось. Среди частиц проб, отобранных в Ладожском озере, для которых определен тип материала как синтетический полимер, преобладал полипропилен (83%), также встречался полиэтилентерефталат. В реке Свирь удалось обнаружить только частицы полиэтилентерефталата.

Таким образом, преобладающими полимерами среди всех проанализированных частиц оказались полипропилен (54%) и полиэтилен (34%), которые относятся к основным типам полимеров в водных объектах (Dusaucy et al., 2021) и полимерами с наибольшим объемом глобального производства (PlasticsEurope, 2022).

Мы предполагаем, что частицы, у которых был определен только пигмент, можно условно принимать за синтетические, т.к. у них отсутствует спектр целлюлозы, и они не прогорают при воздействии лазера. Флуоресценция может быть связана с наличием красителя в составе частиц и делает невозможным определение их спектра, однако если частицы не прогорают на невысоких мощностях лазера их тоже можно условно принимать за синтетические.

4. Обсуждение результатов

В результате данного эксперимента обнаружены особенности данных методов уже на этапе самого отбора проб. Так, сеть Манты больше подходит для буксирования на научно-исследовательском судне из-за ее больших размеров, а также может быть использована только для отбора проб с поверхностного слоя водной толщи. Фильтровальную систему можно использовать не только для отбора проб воды с борта судна, но и с причала или ледового покрова в зимний период, а также она позволяет отбирать пробы с различных водных горизонтов. Объем отфильтрованной

воды при использовании сети Манта значительно больше, что позволяет отобрать более репрезентативные пробы для исследований микропластика в воде. В то же время, насосная фильтровальная система позволяет более точно оценить количество прокачанного через нее объема воды, а ее использование для отбора проб в районах с более высоким уровнем загрязнения облегчит дальнейшую лабораторную обработку проб, что было также обнаружено в работе (Karlsson et al., 2020). Процесс отбора проб воды фильтровальной системой более долгий, однако время, затраченное на их лабораторную обработку, напротив значительно меньше, чем для проб, отобранных сетью Манта, из-за меньшего объема задержанного на фильтре органического материала. Таким образом, два этих метода имеют противоположные достоинства и недостатки, являются комплементарными и на данный момент рекомендуется использование обоих методов. К таким же выводам пришли авторы, которые сравнили данные методы на примере озера Толлензе (Tamminga et al., 2019).

Концентрации микропластика в расчете на 1 м³, полученные при отборе проб фильтровальной системой, значительно превышают концентрации данных частиц при отборе сетью Манта, что также было получено в работах (Montoto-Martínez et al., 2022; Frank et al., 2024). Это может быть связано как с потерей частиц при отборе проб сетью Манта, так и, в случае с фильтровальной системой, с вероятностью переучета количества частиц при малом объеме пробы. Результаты работ (Karlsson et al., 2020; Tamminga et al., 2019) также показали, что объем проб значительно влияет на итоговые концентрации, поэтому необходимо обеспечить отбор проб достаточно большого объема в нескольких повторностях для получения репрезентативной выборки, позволяющей статистически сравнить данные. Следует отметить, что в рамках данной работы наибольшие концентрации микропластика были обнаружены в Мичуринском озере, где суммарный объем пробы при отборе фильтровальной системой оказался наименьшим, что подтверждает необходимость отбора большого объема пробы (желательно не менее 1 м³). Для получения более репрезентативных проб дальнейшее усовершенствование фильтровальной системы может заключаться в увеличении диаметра приемной части, на которой располагаются фильтры, что позволит уменьшить скорость забивания фильтров взвесью и прокачивать больший объем воды. Однако для получения большого объема пробы при помощи насосной фильтровальной системы необходимо также учитывать сезонные особенности водных объектов.

Период отбора проб значительно влияет на эффективность отбора и лабораторной подготовки проб, т.к. присутствие большого количества взвеси в воде в летний период сильно затрудняет обработку и дальнейший анализ проб. В связи с этим для целей сравнения эффективности различных методов без учета сезонных колебаний и гидрологического режима водных объектов рекомен-

дуется отбирать пробы в периоды с наименьшим содержанием взвеси. Сеть Манта рекомендуется использовать при необходимости отобрать пробы с поверхностного слоя в летний период при большом количестве взвеси и в эвтрофированных водоемах, т.к. фильтровальная система в таких условиях быстро забивается и полученные данные при отборе данной системой при объеме пробы менее 1 м³ могут быть не репрезентативными (как, например, в оз. Мичуринском).

Также следует отметить трудности, возникающие при определении полимеров методами спектроскопии комбинационного рассеяния света. Затруднения могут возникать еще на этапе пробоподготовки наиболее мелких частиц, которые нужно отделить от органического вещества (органической среды-окружения, в которой находилась частица), и перенести в отдельную чашку Петри для последующего анализа. Таким образом, чаще всего удается проанализировать только наиболее крупные волокна, а также фрагменты. В данном исследовании определить спектр волокон оказывалось значительно труднее из-за частой флуоресценции образцов, в то время как с фрагментами таких трудностей было меньше. Однако именно волокна составляют большинство частиц микропластика в естественных средах (Acharya et al., 2021). В этой связи, использование сети Манта также может обеспечить попадание в пробы именно фрагментов и пленок, материал которых успешно определяется спектральными методами. В пробах, отобранных фильтровальной системой, а также в наименее объемных пробах, отобранных сетью Манта (Ладожское озеро и река Свирь) большинство обнаруженных частиц приходилось на наименьший размерный диапазон и практически не встречалось фрагментов, что существенно уменьшило выборку, которую можно проанализировать. Помимо этого, у некоторых частиц спектры не совпадали с имеющимися в базе данных, что может быть связано как с деградацией образца в процессе бытования, так и с различиями в заместителях для близких по классу веществ, а также с ограничениями самой библиотеки.

5. Заключение

Было проведено сравнение двух методов отбора проб воды на микропластик на примере Ладожского озера и реки Свирь, а также других озер, ранее не исследованных на содержание данных частиц. Результаты показали, что несмотря на более высокие средние концентрации микропластика при отборе проб насосной фильтровальной системой по сравнению с пробами, отобранными сетью Манта, данные сопоставимы. Учитывая достоинства и недостатки обоих методов, на данный момент нельзя сделать вывод о том, что какой-то из них больше подходит для исследований микропластика в водных объектах. Данные методы являются комплементарными и их следует использовать с учетом научных задач. Сеть Манта больше подходит для отбора большого объема воды с поверхност-

ного слоя в краткие сроки. Насосная фильтровальная система подходит для отбора проб на любых водных горизонтах и в поверхностном слое при небольшом объеме взвеси. Для сравнения данных, полученных разными методами, необходимо обеспечить отбор большого объема воды, что в случае с насосной фильтровальной системой представляется возможным только в период, когда содержание планктона и мутность воды минимальны.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования»). Сеть Манта приобретена при поддержке Фонда поддержки молодых ученых имени Геннадия Комиссарова. Исследование проведено с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ «Геомодель» и «Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники». Авторы благодарят А.Е. Лапенкова, м.н.с. ИНОЗ РАН - СПб ФИЦ РАН, за помощь с отбором проб в малых озёрах и Р.А. Todoroff, МА, Детройт, Мичиган, США за пружиндинг статьи на английском языке.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Acharya S., Rumi S.S., Hu Y. et al. 2021. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review. *Textile Research Journal* 91 (17-18): 2136-2156. DOI: [10.1177/0040517521991244](https://doi.org/10.1177/0040517521991244)

Bagaev A., Mazyuk A., Khatmullina L. et al. 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. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.04.185](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185)

Campanale C., Savino I., Pojar I. et al. 2020. A Practical Overview of Methodologies for Sampling and Analysis of Microplastics in Riverine Environments. *Sustainability* 12(17): 6755. DOI: [10.3390/su12176755](https://doi.org/10.3390/su12176755)

Choy C.A., Robison B.H., Gagne T.O. et al. 2019. The vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column. *Scientific Reports* 9: 7843. DOI: [10.1038/s41598-019-44117-2](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44117-2)

Dai Z., Zhang H., Zhou Q. et al. 2018. Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities. *Environmental Pollution* 242: 1557-1565. DOI: [10.1016/j.envpol.2018.07.131](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.131)

Dris R., Gasperi J., Rocher V. et al. 2018. Synthetic and non-synthetic anthropogenic fibers in a river under the impact of Paris Megacity: sampling methodological aspects and flux estimations. *Science of The Total Environment* 618: 157-164. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.009)

Du R., Sun X., Lin H. et al. 2022. Assessment of manta trawling and two newly-developed surface water microplastic monitoring techniques in the open sea. *Science of The Total Environment* 842: 156803. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.156803](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156803)

Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y. et al. 2021. Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environmental Pollution* 284: 117075. DOI: [10.1016/j.envpol.2021.117075](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117075)

Egger M., Sulu-Gambari F., Lebreton L. 2020. First evidence of plastic fallout from the north pacific garbage patch. *Scientific Reports* 10: 7495. DOI: [10.1038/s41598-020-64465-8](https://doi.org/10.1038/s41598-020-64465-8)

Ео S., Hong S.H., Song Y.K. et al. 2019. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea. *Water Research* 160: 228-237. DOI: [10.1016/j.watres.2019.05.053](https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053)

Frank Y.A., Ershova A.A., Vorobiev E.D. et al. 2024. Comparability of riverine microplastic sampling and processing techniques: intercalibration experiment for the Yenisei River. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry* 34: 89–105. DOI: [10.17223/24135542/34/8](https://doi.org/10.17223/24135542/34/8)

Frank Y.A., Vorobiev D.S., Kayler O.A. et al. 2021. Evidence for Microplastics Contamination of the Remote Tributary of the Yenisei River, Siberia—The Pilot Study Results. *Water* 13(22): 3248. DOI: [10.3390/w13223248](https://doi.org/10.3390/w13223248)

Hale R.C., Seeley M.E., La Guardia M.J. et al. 2020. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research - Oceans* 125(1): 1-40. DOI: [10.1029/2018JC014719](https://doi.org/10.1029/2018JC014719)

Il'ina O.V., Kolobov M.Y., Il'inskii V.V. 2021. Plastic Pollution of the Coastal Surface Water in the Middle and Southern Baikal. *Water Resources* 48: 56–64. DOI: [10.1134/S0097807821010188](https://doi.org/10.1134/S0097807821010188)

Karlsson T.M., Kärrman A., Rotander A. et al. 2020. Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters. *Environmental science and pollution research* 27: 5559-5571. DOI: [10.1007/s11356-019-07274-5](https://doi.org/10.1007/s11356-019-07274-5)

Kooi M., Reisser J., Slat B. et al. 2016. The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean. *Scientific Reports* 6: 33882. DOI: [10.1038/srep33882](https://doi.org/10.1038/srep33882)

Lenaker P.L., Baldwin A.K., Corsi S.R. et al. 2019. Vertical distribution of microplastics in the water column and surficial sediment from the Milwaukee River basin to Lake Michigan. *Environmental Science & Technology* 53: 12227-12237. DOI: [10.1021/acs.est.9b03850](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03850)

Leusch F.D., Lu H.C., Perera K. et al. 2023. Analysis of the literature shows a remarkably consistent relationship between size and abundance of microplastics across different environmental matrices. *Environmental Pollution* 319: 120984. DOI: [10.1016/j.envpol.2022.120984](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120984)

Leusch F.D.L., Ziajahromi S. 2021. Converting mg/L to Particles/L: Reconciling the Occurrence and Toxicity Literature on Microplastics. *Environmental Science & Technology* 55(17): 11470-11472. DOI: [10.1021/acs.est.1c04093](https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04093)

Liedermann M., Gmeiner P., Pessenlehner S. et al. 2018. A methodology for measuring microplastic transport in large or medium rivers. *Water* 10(4): 414. DOI: [10.3390/w10040414](https://doi.org/10.3390/w10040414)

Lindeque P.K., Cole M., Coppock R.L. et al. 2020. Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. *Environmental Pollution* 265: 114721. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114721](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721)

Montoto-Martínez T., Meléndez-Díez C., Melián-Ramírez A. et al. 2022. Comparison between the traditional Manta net and an innovative device for microplastic sampling

in surface marine waters. *Marine Pollution Bulletin* 185(A): 114237. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2022.114237](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114237)

Pasquier G., Doyen P., Kazour M. et al. 2022. Manta Net: The Golden Method for Sampling Surface Water Microplastics in Aquatic Environments. *Frontiers in Environmental Science* 10: 811112. DOI: [10.3389/fenvs.2022.811112](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.811112)

Plastics EuroPlastics pe. - the Facts 2022. 2022. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/> (дата обращения: 22.05.2024)

Reisser J., Slat B., Noble K. et al. 2015. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. *Biogeosciences* 12(4): 1249. DOI: [10.5194/bg-12-1249-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-1249-2015)

Simon M., van Alst N., Vollertsen J. 2018. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research* 142: 1-9. DOI: [10.1016/j.watres.2018.05.019](https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.019)

Song Y.K., Hong S.H., Eo S. et al. 2018. Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters. *Environmental Science & Technology* 52: 12188-12197. DOI: [10.1021/acs.est.8b04032](https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04032)

Statistics Kingdom. 2017. URL: <https://www.statskingdom.com/index.html> (accessed 22 May 2024).

Tamminga M., Fischer E.K. 2020. Microplastics in a deep, dimictic lake of the North German Plain with special regard to vertical distribution patterns. *Environmental Pollution* 267: 115507. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115507](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115507)

Tamminga M., Stoewer S.-C., Fischer E.K. 2019. On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis. *Environmental Pollution* 254: 112970. DOI: [10.1016/j.envpol.2019.112970](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112970)

Tikhonova D.A., Karetnikov S.G., Ivanova E.V. et al. 2024. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resources* 51: 146-153. DOI: [10.1134/S009780782370063X](https://doi.org/10.1134/S009780782370063X)

Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubinc A.Y. et al. 2019. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 138: 193-205. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2018.11.047](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.047)

Ершова А.А., Еремина Т.Р., Дунаев А.Л. и др. 2021. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока. *Арктика: экология и экономика* 11(2): 164-177. DOI: [10.25283/2223-4594-2021-2-164-177](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-164-177)

Иванова Е.В., Тихонова Д.А. 2022. Оценка содержания частиц микропластика в Ладожском озере. *Труды Карельского научного центра РАН* 6: 58-67. DOI: [10.17076/lim1582](https://doi.org/10.17076/lim1582)

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. 2015. В: Румянцев В.А. (Ред.). Санкт-Петербург: Нестор-История.

Поздняков Ш.Р., Каретников С.Г., Иванова Е.В. и др. 2021. Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще. *Российский журнал прикладной экологии* 4(28): 41-45. DOI: [10.24852/2411-7374.2021.4.41.45](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.4.41.45)

Резолюция Первой Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment – 2022». 2022. URL: http://microplasticsiberia.com/wp-content/uploads/2022/08/Резолюция МРЕ-2022_fin.pdf (дата обращения: 22.05.2024)