

Микроскопические частицы синтетических полимеров в пресноводных экосистемах: изученность и современное состояние

© 2020. О. В. Никитин¹, к. г. н., зав. кафедрой, В. З. Латыпова^{1,2}, д. х. н., профессор, г. н. с., Т. Я. Ашихмина^{3,4}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией, Р. С. Кузьмин⁵, директор, Э. И. Насырова¹, аспирант, И. И. Харипов¹, магистрант,

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,

²Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,

³Вятский государственный университет, 610002, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

⁴Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

⁵ООО «Экоаудит», 420061, Россия, г. Казань, ул. Сеченова, д. 17,
e-mail: olnova@mail.ru

В статье на основе анализа научных публикаций по продуктам распада пластиковых отходов (микропластиком) в водной среде в библиографических базах данных Web of Science (Clarivate Analytics) и eLIBRARY.RU (Научная электронная библиотека), проведена оценка представленности проблемы в научной литературе (по октябрь 2020 г.). Показано, что в мире исследование проблем, связанных с микропластиками, становится актуальной областью исследований: база Web of Science на запрос, содержащий термин «microplastic», выдаёт 5273 публикаций (первые – в 1975 г.), из них 503 (9,5%) относятся к пресноводным экосистемам; в последние годы наблюдается существенный рост доли публикаций в этой области – от 4,5% в 2013 г. до 11% в 2020 г. (3 и 175 публикаций соответственно). В отечественной литературе (по базе eLIBRARY.RU) тема микропластика в окружающей среде представлена слабо: 149 публикаций (первые – в 2015 г.), значительная часть публикаций (55%) – это обзорные статьи и исследования, посвящённые морским экосистемам; далее в порядке убывания – методические работы и работы по математическому моделированию поведения частиц микропластика в природных средах (18%), по воздействию микропластика на живые системы (5,8%). Непосредственно с исследованием пресноводных систем связаны всего 10 публикаций за 2015–2020 гг. (6,5%).

Охарактеризовано мировое производство пластмасс, основные источники поступления микропластика в водную среду, их потенциальная опасность для водных экосистем и сведения об уровне содержания частиц микропластика в различных пресноводных матрицах.

Ключевые слова: пластиковые отходы, микропластик, пресноводные экосистемы, изученность в литературе, мониторинг.

Microscopic particles of synthetic polymers in freshwater ecosystems: review and the current state of the problem

© 2020. O. V. Nikitin¹ ORCID: 0000-0002-6753-0597, V. Z. Latypova^{1,2} ORCID: 0000-0002-8490-6939, T. Ya. Ashikhmina^{3,4} ORCID: 0000-0003-4919-0047, R. S. Kuzmin⁵ ORCID: 0000-0001-8066-1148, E. I. Nasyrova¹ ORCID: 0000-0001-6648-9185, I. I. Haripov¹ ORCID: 0000-0003-2782-730X,

¹Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlovskaya St., Kazan, Russia, 420008,

²Institute of Problems of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of Republic of Tatarstan, 28, Daurskaya St., Kazan, Russia, 420087,

³Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610002,

⁴Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS, 28, Kommunisticheskaya St., Syktывkar, Russia, 167000,

⁵Ekoaudit LLC, 17, Sechenova St., Kazan, Russia, 420061,
e-mail: olnova@mail.ru

Based on the analysis of scientific publications on the decomposition products of plastic waste (microplastics in the aquatic environment) in the Web of Science (Clarivate Analytics) and eLIBRARY.RU (Scientific Electronic Library) databases, an assessment of the problem's representation in the scientific literature (up to October 2020) was carried out. It is shown that in the world, the study of microplastics problems is becoming an urgent area of research. The Web of Science database for a request containing the term "microplastic" produces 5273 publications (the first in 1975), 503 (9.5%) of which refer to freshwater ecosystems; in recent years, there has been a significant increase in the share of publications in this area – from 4.5% in 2013 to 11% in 2020 (3 and 175 publications, respectively).

In Russian literature (according to the eLIBRARY.RU database), the study of microplastics in the environment is poorly represented: only 149 publications (the first one in 2015). A significant part of publications (55%) are review articles and studies devoted to marine ecosystems; further in descending order – methodical work and work on mathematical modeling of the behavior of microplastics in environments (18%), on the effect of microplastics on living systems (5.8%). Only ten publications for 2015–2020 are directly related to the study of freshwater ecosystems (6.5%).

The world production of plastics, the main sources of microplastics entering the aquatic environment, their potential hazard to aquatic ecosystems, and information on the level of microplastics in various freshwater matrices are characterized.

Keywords: plastic waste, microplastics, freshwater ecosystems, literature review, monitoring.

В научных публикациях последних лет поднимается одна из актуальных проблем, связанная с обнаружением в компонентах водной среды микропластика – продукта распада пластиков (крупнотоннажных искусственных материалов) в природной среде [1]. При этом основное внимание долгое время уделялось лишь морским экосистемам [2, 3]. В связи с этим анализ научных публикаций по продуктам распада пластиковых отходов в поверхностных пресных водах с целью оценки представленности данной проблемы в научной литературе является чрезвычайно актуальным.

В ходе работы на основе анализа научных публикаций по микропластикам в водных экосистемах в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science (Clarivate Analytics) и eLIBRARY.ru (Научная электронная библиотека) дана оценка представленности проблемы в современной мировой и отечественной научной литературе (по октябрь 2020 г.); были охарактеризованы основные источники поступления микропластиков в водную среду, потенциальная опасность микропластиков для биотических компонентов водных экосистем и уровень содержания частиц микропластиков в различных пресноводных матрицах.

Оценка представленности проблемы микропластиков в пресноводных экосистемах в научной литературе

В работе осуществляли поиск по ключевым словам в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) и eLIBRARY.RU (Научная электронная библиотека). Поискный запрос для базы Web of Science – «microplastic*», «microplastic* AND

freshwater» (поиск по названию, аннотации, ключевым словам); для базы eLIBRARY.RU – «микропластик» (по названию, аннотации, ключевым словам). Годы поиска – с момента первого упоминания по октябрь 2020 г.

До недавнего времени основное внимание было приковано к проблеме загрязнения микропластиком преимущественно морских экосистем. Это можно проиллюстрировать данными из базы данных научных публикаций Web of Science. На запрос, содержащий термин «microplastic*», система выдаёт 5273 публикаций (первые в 1975 г.), из них только 503 (9,5%) относятся к пресноводным системам (дополнительно содержат термин «freshwater»). В последние годы наметился значительный рост публикаций, сокращающий этот разрыв – от 4,5% публикаций в 2013 г. до 11% в 2020 г. (рис. 1). Среди стран лидерами являются Китай, США и Германия, на их долю приходится 53% всех публикаций в указанной области.

В отечественной базе eLIBRARY.RU количество публикаций, посвящённых микропластику в окружающей среде (ОС), существенно меньше – всего 149 (рис. 2), первые публикации датированы 2015 г., на последние два года приходится основная доля всех материалов (более 65%). Основная масса всех публикаций (55%) – это обзорные статьи и исследования, посвящённые морским экосистемам. Часть публикаций (18%) посвящена разбору и разработке методов отбора проб природных сред для выявления микропластикового загрязнения, а также математическому моделированию процессов загрязнения и поведения частиц микропластика в средах. Несколько статей (6%) посвящены воздействию на живые системы (содержание частиц микропластика в пищеварительном тракте, токсикологические исследования).

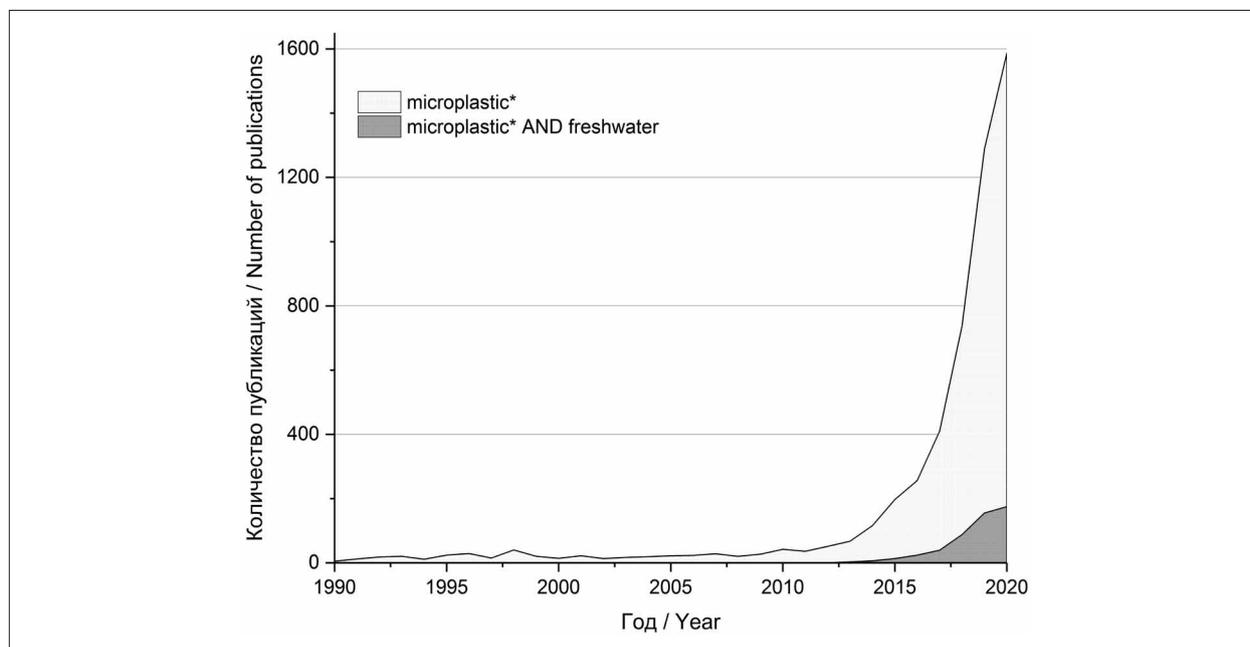


Рис. 1. Количество публикаций в базе Web of Science, посвящённых микропластику в пресноводных экосистемах, от общего количества публикаций
Fig. 1. The number of publications in the Web of Science database devoted to microplastics in freshwater ecosystems of the total number of publications



Рис. 2. Количество статей в базе eLIBRARY.ru, посвящённых различным аспектам исследования микропластика в окружающей среде
Fig. 2. The number of publications in the eLIBRARY.ru database devoted to various aspects of microplastics research in the environment

Непосредственно с исследованием пресноводных экосистем связаны всего 10 публикаций российских учёных. Две из них посвящены содержанию частиц микропластика в сточной воде водоканала г. Санкт-Петербурга [4]. Две описывают содержание микропластика в р. Дон в Цимлянском водохранилище (2019 г.) и в устьевой части [5]. Больше всего публикаций представлено по пресноводным системам Северо-Запада России: по аквато-

риям р. Невы [6–8] и Ладожского озера [9, 10]. В частности, в ходе проведённых работ на Ладожском озере частицы микропластика были зарегистрированы во всех исследуемых образцах, независимо от места отбора по акватории и на притоках. Минимальная концентрация частиц микропластика (0,02 частиц/л) зафиксирована в северной части озера, вблизи острова Валаам. В южных частях озера концентрация резко возрастает и колеблется

от 0,8 до 2,4 частиц/л. Одновременно с работами на акватории Ладожского озера были проведены исследования на некоторых его притоках. Максимальные концентрации, составлявшие 2,4 частицы/л, зафиксированы в устье р. Морье, в нескольких километрах от свалки бытового мусора [9]. Также имеется информация по содержанию микропластика в р. Преголя (г. Калининград) и р. Раменка (ЮЗАО г. Москвы) [11].

В единичных исследованиях показано наличие частиц микропластика в атмосферных выпадениях [12], а также в водопроводной воде [13].

Характеристика мирового производства пластмасс, классификация микропластика и основные источники его поступления в водную среду

Мировое производство пластмасс (синтетических органических полимеров) сильно возросло за последние десятилетия: с 1,7 млн т в 1950 г. [14] до 348 млн т в 2017 г. [15]) и продолжает увеличиваться. Наиболее широко производимыми пластмассами являются полипропилен (PP), полиэтилен (PE), полистирол (PS), полиэтилентерефталат (PET) и поливинилхлорид (PVC) [16]. Вследствие больших объёмов производства и долговечности, пластмассы встречаются в ОС, что вызывает серьёзные опасения. По оценкам исследователей [17] на 2015 г., в ОС накопилось 4,9 млрд т. пластиковых отходов, что составляет около 60% от всех когда-либо произведённых пластмасс.

Одной из составляющих проблемы является достоверное обнаружение в континентальных поверхностных водах и мировом океане частиц микропластика. Под микропластиком преимущественно понимают мелкие полимерные частицы с размерами менее 5,0 мм [18, 19], включающие как пластиковые гранулы, изначально имеющие микроскопические размеры, так и фрагменты более крупных объектов. В литературе встречаются и иные варианты классификации частиц микропластика: < 1 мм [20], < 2 мм [21], 2–6 мм [22] и < 10 мм [23].

Выделяют два основных источника, приводящих к образованию микропластика: непосредственный привнос в водную среду со сточными водами (некоторые фрагменты (микро- и наночастицы), используемые в потребительских товарах, гранулы, входящие в состав косметических скрабов, или промышленные синтетические абразивы) и выветрива-

ние (выщелачивание) пластмассовых отходов и изделий в водной среде. Измельчение крупных кусков происходит за счёт воздействия микроорганизмов, процессов термоокисления, гидролиза, деформации и механического разрушения под воздействием солнечных лучей, ветра и волн [1].

В зависимости от источника поступления в ОС микропластики классифицируются как первичные и вторичные [14, 24]. Источники поступления микропластика в водные объекты, обсуждаемые в литературе [1], следует дополнить также одним из важнейших процессов дифференциации вещества в ОС – поверхностным стоком с индустриально освоенного водосбора (промышленные площадки предприятий, жилые массивы поселений, автотрассы, полигоны отходов, свалки, зоны рекреации и т. д.).

В таблице представлена классификация микропластика по источнику поступления и процессам, приводящим к его образованию с учётом отмеченных выше дополнений.

Воздействие микропластика на биотическую составляющую водных экосистем

Из-за своего небольшого размера микропластики могут заглатываться многочисленными организмами, включая представителей зоопланктона и других животных (моллюсков, ракообразных, рыб, птиц). Механизмы токсичности микропластика всё ещё плохо изучены, но его потенциальные токсические эффекты могут возникнуть в результате [26]:

1. Стресса, вызванного поеданием частиц, включая расход энергии на экскрецию, закупорку пищеварительной системы и появление так называемой ложной сытости.

2. Выделения добавок из пластмасс, включая пластификаторы.

3. Воздействия загрязнений, сорбированных микропластиком, таких как стойкие органические загрязнители и др.

Токсичные компоненты пластмасс и сорбированные в микропластике материалы могут представлять новые пути воздействия химических веществ при попадании в организм. Потенциальные эффекты от физического и химического воздействия микропластика включают в себя разнообразные поведенческие, морфологические, репродуктивные и токсикологические эффекты, оказывающие сублетальное и летальное воздействие. Пере-

Классификация микропластика по источнику поступления и процессам, приводящим к его образованию ([14] с изменениями) / Classification of microplastics by source of receipt and processes leading to its formation ([14] revised)

Группа микропластика Microplastics group	Источники поступления и процессы, приводящие к образованию микропластика / Input sources and processes leading to the formation of microplastics
Первичные микропластики Primary microplastics	<i>Поступление в водную среду компонентов в составе сточных вод / Entering the aquatic environment of components in wastewater</i>
	Средства личной гигиены (скрабирующие средства эксфолиантов и др.) / Specific personal care products containing microplastics as exfoliants or abrasives
	Специальные лекарственные средства, включая средства для полировки зубов / Specific medical applications (e.g. dentist tooth polish)
	Промышленные абразивы / Industrial abrasives
	Буровые растворы / Drilling fluids for oil and gas exploration
	Сырьё для производства пластмасс, поверхностный сток с производственных территорий / Raw materials for the production of plastics, runoff from processing facilities
Вторичные микропластики Secondary microplastics	<i>Поверхностный сток продуктов выветривания (выщелачивания) и разрушения пластмассовых отходов и изделий в местах размещения/использования пластмассовых изделий и отходов / Surface runoff of products of weathering (leaching) and destruction of plastic waste and products in the places of disposal and use of plastic products and waste</i>
	Пластиковые отходы / General littering, dumping of plastic waste
	Истирание пластика на свалках и объектах переработки / Abrasion and shredding of plastic in landfills and recycling facilities
	Пластиковые отходы после рекреационной активности / Plastic waste after recreational activities
	Пластмасса в составе органических отходов / Plastic items in organic waste
	Синтетические полимеры в составе красок / Paints based on synthetic polymers
	Полимеры в составе компостирующих добавок / Synthetic polymer particles used to improve soil quality and as composting additive
	Волокна, выделяемые из гигиенических средств / Release of fibres from hygiene products
	Волокна, выделяемые из синтетического текстиля / Release of fibres from synthetic textiles
	Истирание автомобильных шин / Abrasion of car tyres
	<i>Выветривание (выщелачивание) в водной среде следующих пластмассовых изделий и отходов / Weathering (leaching) in the aquatic environment of the following plastic products and waste</i>
	Пластиковые рыболовные снасти / Plastic fishing tackle
	Судовой мусор / Material lost or discarded from ships

численные эффекты наблюдались у множества организмов [25].

Опасение также вызывает тот факт, что загрязнение пресных вод частицами микропластика не ограничивается лишь поверхностными водами, частицы микропластика встречаются в подземных водах, в питьевой воде систем водоснабжения и бутилированной воде, обнаруживаются также в организме человека. Хотя характер наносимых ими повреждений не установлен, обычно указывается на возможность накопления микрочастиц в лёгких, закупорку сосудов, тромбообразование, проявления канцерогенного эффекта. Необходимо отметить, что в настоящее время не регламентирован и безопасный уровень

концентрации частиц микропластиков (ПДК) в водных объектах [26].

Уровень содержания частиц микропластика в различных пресноводных матрицах

Исследования в мире показывают, что, как и в морской среде, частицы микропластика повсеместно встречаются в различных пресноводных матрицах в широком диапазоне концентраций ($1 \cdot 10^2 - 10^8$ частиц/ m^3) [27]. Например, зарегистрированные концентрации микропластика в пробах поверхностных вод р. Рейн (Германия) в среднем составляют 892777 частиц/ km^2 с пиковой концентрацией

3,9 млн частиц/км². В речных донных отложениях количество частиц колеблется от 228 до 3763 и от 786 до 1368 частиц/кг (р. Рейн и р. Майн, Германия) соответственно. Высокие концентрации микропластика в поверхностных водах отмечены для р. Янцзы у плотины Три ущелья, Китай (192–13617 частиц/км²), что связано с отсутствием очистных сооружений в небольших городах, а также с проблемами инфраструктуры по переработке и удалению отходов. Эти исследования могут недооценивать фактические концентрации микропластика, потому что их разделение и идентификация основаны на методах визуального наблюдения и могут исключать обнаружение частиц в диапазонах субмикронных размеров [28].

Частицы микропластика представлены следующим рядом по снижению их концентрации в водах пресноводных экосистем для следующих типов пластиков из числа крупнотоннажных материалов:

полиэтилен (PE) ≈ полипропилен (PP) > стирольные пластики (PS) > поливинилхлорид (PVC) > полиэтилентерефталат (PET).

Представленный ряд, по-видимому, отражает, с одной стороны, глобальный спрос на пластик, а с другой, – более высокую склонность к седиментации PVC и PET в силу их более высокой плотности. Фрагменты, волокна, плёнка, пена и гранулы являются наиболее часто встречающимися формами микропластика при их миграции в водной среде [27].

Заключение

Таким образом, на основе анализа научных публикаций по микроскопическим частицам синтетических полимеров в водных экосистемах показано, что исследование микропластика в водах пресноводных экосистем становится актуальной областью исследований. В отечественной литературе (по базе eLIBRARY.RU) значительная часть публикаций (25%) посвящена микропластикам в морских экосистемах, непосредственно с исследованием пресноводных систем связано всего 6% публикаций (2015–2020 гг.). Можно отметить лишь одиночные исследования уровня содержания микропластика в воде и донных отложениях в акватории Ладожского озера, рек Невы, Дона, Преголи и Раменки.

Охарактеризовано мировое производство пластмасс, дана классификация микропластика по ряду критериев, описаны основные

источники его поступления в водную среду, воздействие микропластика на биотические компоненты водных экосистем и уровень содержания частиц микропластика в различных пресноводных матрицах.

Исследование, проведённое в 2019 г. авторами данной статьи, выявило микропластик в поверхностных водах Казанского залива Куйбышевского водохранилища в количествах (60–350 частиц/м³), соответствующих описанным в литературе различным пресноводным матрицам [27], а также позволило охарактеризовать фракции микропластика и рассчитать количество его ежегодного приноса в р. Волгу как фактора повышения токсикогенности среды обитания.

С учётом неизбежного роста мирового производства синтетических органических полимеров, обнаружения продуктов распада пластиковых отходов в водной среде и слабой изученности механизмов токсичности и опасности микропластика для живых организмов, важнейшими задачами в области обеспечения водной безопасности являются активизация исследований в рассматриваемой области в России, включение микропластика в число химико-биологических показателей действующей программы мониторинга пресноводных экосистем, создание системного подхода к его проведению на единой методологической основе и с использованием единой методической базы.

References

1. Kozlovskii N.V., Blinovskaia J.Y. Microplastic is world ocean marcoproblem // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015. No. 10. P. 159–162 (in Russian).
2. Nikitin O.V., Latypova V.Z., Minnegulova L.M., Nasyrova E.I. Microplastics pollution of freshwater environments: the need for monitoring and control // Chemistry and Environmental Engineering: Proceedings of the International Scientific Conference. Kazan: Publishing House of IP Sagieva A.R., 2019. P. 154–160 (in Russian).
3. Rumjantsev V.A., Pozdnyakov Sh.R., Kryukov L.N. To the issue based on the problem of microplastic in inland-waters // Russian Journal of Applied Ecology. 2019. No. 2 (18). P. 60–64 (in Russian).
4. Pankova G.A., Rublevskaya O.N., Leonov L.V. Evaluation of the qualitative composition of domestic wastewater on example of St. Petersburg // Water Treatment. Water Preparation. Water Supply. 2015. No. 12 (96). P. 46–53 (in Russian).
5. Kleschenkov A.V., Lastovina T.A., Budnik A.P., Plyaka P.S., Filatova T.B. Some results of the study of microplastics in the mouth area of the Don // Complex Research of the World Ocean: Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. Kaliningrad: Institut

oceanologii im. P.P. Shirshova Rossiyskoy akademii nauk, 2020. P. 417–448 (in Russian).

6. Kaurova Z.G., Karpov D.D. Study of microplastics in the Neva River and the Gulf of Finland // Actual problems of ecology and nature management: Materialy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennoy 75-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskaya gosudarstvennaya akademiya veterinarnoy meditsiny, 2020. P. 47–49 (in Russian).

7. Karpov D.D., Kaurova Z.G. Study on distribution of microplastics in water of the Neva River and the Finnish Gulf // Voprosy normativno-pravovogo regulirovaniya v veterinarii. 2020. No. 3. P. 159–161 (in Russian). doi: 10.17238/issn2072-6023.2020.3.159

8. Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Guzeva A.V., Shalunova E.P., Martinson K.D., Tikhonova D.A. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland // Water Resources. 2020. V. 47. No. 4. P. 599–607. doi: 10.1134/S0097807820040132

9. Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V. Estimation of the microplastics concentrations in the water column and bottom sediments of Ladoga Lake // Regionalnaya ekologiya. 2018. No. 4 (54). P. 48–52 (in Russian). doi: 10.30694/1026-5600-2018-4-48-52

10. Guzeva A.V., Zelenkovsky P.S., Ivanova E.V., Tikhonova D.A. Investigation of microplastic particles in the Gulf of Finland and Lake Ladoga // Complex Studies of the World Ocean: Materialy V Sverossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. Kaliningrad: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova Rossiyskoy akademii nauk, 2020. P. 414–415 (in Russian).

11. Morozova A.S., Mazlova E.A., Blinovskaya Ya.Yu., Kulikova O.A., Fomin E.I., Smirnov V.K. Microplastics research in the Russian seas and rivers coastal zone // Science, education, production in solving environmental problems (Ecology–2020): Materialy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennoy 75-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskaya gosudarstvennaya akademiya veterinarnoy meditsiny, 2020. P. 187–198 (in Russian).

12. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Papyan E.E., Spassky V.V., Kukushkin S.Yu., Yanson S.Yu. Chemical composition of snow in Sibay City (Bashkortostan) as an indicator of environmental quality // Sustainable development of territories: theory and practice: Materialy X Sverossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, v 2-kh tomakh. V. 2. Sibay: Sibayskiy informatsionnyy tsentr filial GUP RB Izdatelskiy dom “Respublika Bashkortostan”, 2019. P. 196–198 (in Russian).

13. Volobuev V.S., Gorzhanov V.V. Research of water quality from a water supply system based on polypropylene pipes // Metrological Support of Innovative Technologies: Tezisy Mezhdunarodnogo foruma. Sankt-Peterburg: GUAP, 2019. P. 29–31 (in Russian).

14. Duis K., Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal

care products), fate and effects // Environ. Sci. Eur. 2016. V. 28 (4). P. 1–25. doi: 10.1186/s12302-015-0069-y

15. Plastics – the Facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: Plastics Europe, 2018. 61 p.

16. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // Marine Pollution Bulletin. 2011. V. 62 (8). P. 1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

17. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. 2017. V. 3 (7). Article No. e1700782. doi: 10.1126/sciadv.1700782

18. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments // Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. 2009. V. 364 (1526). P. 1985–1998. doi: 10.1098/rstb.2008.0205

19. Rocha-Santos T., Duarte A.C. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment // TrAC Trends Anal. Chem. 2015. V. 65. P. 47–53. doi: 10.1016/j.trac.2014.10.011

20. Claessens M., Meester S.D., Landuyt L.V., Clerck K.D., Janssen C.R. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast // Marine Pollution Bulletin. 2011. V. 62 (10). P. 2199–2204. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.06.030

21. Ryan P.G., Moore C.J., van Franeker J.A., Moloney C.L. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment // Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. 2009. V. 364 (1526). P. 1999–2012. doi: 10.1098/rstb.2008.0207

22. Derraik J.G.B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // Marine Pollution Bulletin. 2002. V. 44 (9). P. 842–852. doi: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5

23. Graham E.R., Thompson J.T. Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2009. V. 368 (1). P. 22–29. doi: 10.1016/j.jembe.2008.09.007

24. Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T.S. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review // Marine Pollution Bulletin. 2011. V. 62 (12). P. 2588–2597. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025

25. da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T.A.P. Microplastics – occurrence, fate and behaviour in the environment // Comprehensive Analytical Chemistry. 2017. V. 75. P. 1–24. doi: 10.1016/bs.coac.2016.10.004

26. Savanina Ya.V., Barskiy E.L., Fomina I.A., Lobakova E.S. Pollution of aquatic medium by microparticle of polymers // ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii. 2019. No. 2 (12). P. 54–58 (in Russian).

27. Koelmans A.A., Mohamed Nor N.H., Hermesen E., Kooi M., Mintenig S.M., De France J. Microplastics in freshwaters and drinking water: critical review and assessment of data quality // Water Research. 2019. V. 155. P. 410–422. doi: 10.1016/j.watres.2019.02.054

28. Lambert S., Wagner M. Microplastics are contaminants of emerging concern in freshwater environments: an overview // Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry / Eds. M. Wagner, S. Lambert. Springer, 2018. V. 58. P. 1–24. doi: 10.1007/978-3-319-61615-5_1