

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
APPLIED PROBLEMS

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-308-323>  
УДК 551.577; 504.06



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Частицы синтетических полимеров в свежеснежившем снеге  
на северо-западе Кольского полуострова в 2020–2021 гг.**

*М.В. Митяев\**, *Е.И. Дружкова*, *М.В. Герасимова*

*Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия*

*\*mityaev@mmbi.info*

**Резюме**

Загрязнение гидросферы, атмосферы и верхней части литосферы синтетическими полимерами признано в настоящее время глобальной проблемой человечества, в рамках решения которой одной из приоритетных задач является выявление путей и масштабов миграции полимерных частиц. В связи с этим с декабря 2020 г. по апрель 2021 г. на северо-западе Кольского полуострова были проведены исследования свежеснеживших твердых атмосферных осадков с целью выявления в них полимерных частиц, которые могли быть абсорбированы из атмосферы кристаллами снега. В талой снеговой воде полимерные частицы идентифицировались под бинокулярным микроскопом МБС-10 и эпифлуоресцентным микроскопом Carl Zeiss AxioImager D1. Данные о потоках полимерных частиц на поверхность земли с твердыми атмосферными осадками на северо-западе Кольского полуострова получены впервые.

**Ключевые слова:** Кольский полуостров, полимерные макроволокна, полимерные микроволокна, полимерные фрагменты, полимерные частицы, потоки полимерных частиц, свежеснеживший снег.

**Для цитирования:** *Митяев М.В., Дружкова Е.И., Герасимова М.В.* Частицы синтетических полимеров в свежеснежившем снеге на северо-западе Кольского полуострова в 2020–2021 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 308–323. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-308-323>.

Поступила 25.04.2022

После переработки 22.08.2022

Принята 30.08.2022

**Particles of synthetic polymers in fresh snow in the northwest  
of the Kola peninsula in 2020–2021**

*Maxim V. Mityaev\**, *Elena I. Drushkova*, *Marina V. Gerasimova*

*Murmansk marine biological institute RAS, Murmansk, Russia*

*\*mityaev@mmbi.info*

**Summary**

Pollution of the hydrosphere, the atmosphere and the upper lithosphere by synthetic polymers has now become a global human problem. In this connection, a study of newly fallen solid precipitation was carried out from December 2020 to April 2021 in the north-west of the Kola Peninsula to identify polymeric particles that could

be absorbed from the atmosphere by snow crystals. Snow sampling was carried out along highways at a distance from roads in calm weather. In the laboratory, melt snow water was filtered through nuclear filters, which were scanned under a binocular MBS-10 microscope to take account of insoluble polymer fibers. Simultaneously, filters stained with a Nile Red solution were analyzed under a Carl Zeiss AxioImager D1epifluorescent microscope for microplastic investigations. Synthetic polymer particles were identified among the aerosol material. The polymeric particle composition was strongly dominated by irregularly shaped polymer micro-fragments. Polymer macrofibres and polymer microfibers were also constantly present. By the research carried out the first assessment of polymeric particles flows to the earth surface with solid precipitation in the north-west of the Kola Peninsula was done.

**Keywords:** flows of polymer particles, freshly fallen snow, Kola Peninsula, polymer fragments, polymer macrofibers, polymer microfibers, polymer particles.

**For Citation:** *Mityaev M.V., Drushkova E.I., Gerasimova M.V.* Particles of synthetic polymers in fresh snow in the northwest of the Kola peninsula in 2020–2021. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 278–294. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-278-294>.

Received 25.04.2022

Revised 22.08.2022

Accepted 30.08.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Замена традиционных природных материалов более дешевым, прочным и долговечным пластиком (искусственно синтезированными высокомолекулярными полимерами) началась в 50-х гг. прошлого века, и с этого времени объемы его производства нарастали в геометрической прогрессии по всему миру. Если в 50-е гг. XX в. мировое производство синтетических материалов составляло около 5 млн тонн в год, то уже в 2020 г. эта цифра превысила 360 млн тонн [1]. Это естественным образом привело к росту количества отходов синтетических полимеров, скопления которых уже в 1970-х гг. стали обнаруживаться на морских акваториях [2]. Однако истинные масштабы проблемы начали вырисовываться только в конце XX в., после открытия в 1997 г. Чарльзом Муром Большого тихоокеанского мусорного пятна, площадь которого оценивали в 10 млн км<sup>2</sup>. На первой Ассамблее Программы ООН по окружающей среде (июнь 2014 г., Найроби, Кения) пластиковый мусор в океане был признан «общей заботой всего человечества» [3]. В 2018 г. было установлено, что влияние, оказываемое полимерными частицами на экосистемы, обратно пропорционально их размеру [4]. Таким образом, выявилась основная опасность синтетических полимеров — разрушение (под действием различных физических, химических и биологических процессов) полимерных обломков на мельчайшие фрагменты и волокна, оказывающие негативное влияние на живые организмы всех трофических уровней [5], включая человека [6]. Для обозначения таких частиц стал использоваться термин «микропластик» (впервые предложенный R.C. Thompson с соавторами в 2004 г. [7]). В настоящее время частицы микропластика обнаружены повсеместно — в морях [8, 9] (в том числе и на больших глубинах), донных отложениях [9–11], в пресноводных водоемах [12], в почве [13], атмосфере [14], на дрейфующих льдах Арктики [15, 16], в горных странах (на больших высотах — Альпы [17], Гималаи [18, 19]), на ледниках Антарктиды [20]. По мере осознания научным сообществом масштабов наносимого ущерба возрастало и количество публикаций по проблеме в целом (к 2020 г. в базе цитирования WoS было зафиксировано около 2000 печатных работ [21]). Значительная часть этих исследований связана с морскими акваториями. В качестве одной из приоритетных задач было выявление путей миграции полимерных частиц в океан. Частично решение удалось найти при изучении микропластика в труднодоступных высокогорных районах

[17–19], где атмосферный перенос признан основным механизмом его поступления [22]. Несмотря на это, к настоящему времени научных публикаций по микропластику в атмосфере насчитывается всего около двадцати [21], причем подавляющее их большинство касается определения содержания микропластика в атмосфере, что не позволяет количественно охарактеризовать масштабы его выпадения на поверхность земли. Возможно, эту проблему можно решить, изучая атмосферные осадки, так как справедливо считается, что именно атмосферные осадки очищают атмосферу от различных аэрозолей [23, 24], причем наиболее эффективно процесс вымывания осуществляется твердыми атмосферными осадками [24]. Следовательно, наиболее эффективным методическим решением в определении масштабов поступления полимерных частиц из атмосферы является определение количества полимерных частиц, выпадающих на единицу земной поверхности с твердыми атмосферными осадками. Но именно таких исследований в мировой литературе единицы, и все они носят точечный характер. Объем научных трудов российских ученых, посвященных полимерным частицам в Баренцевоморском регионе, невелик (по сравнению с Балтийским морем), обзор опубликованных работ представлен в статье [9]. Все работы посвящены изучению количества полимерных частиц в водной толще Баренцева моря и в прибрежных отложениях архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Исследований количества полимерных частиц в твердых атмосферных осадках в Российском секторе Арктики до настоящего времени не проводилось, между тем они особенно целесообразны в высокоширотных районах Кольского полуострова, где выпадение твердых атмосферных осадков происходит 180–200 дней в году [25].

При несомненной актуальности проблемы, пожалуй, основная трудность ее решения — отсутствие единого методологического подхода и методической базы. В первую очередь это касается определения размерных фракций полимерных частиц. В большинстве исследований минимальный размер фрагментов определяется ограничениями используемых методик (11 мкм в [15], 50 мкм в [26], 200 мкм в [27]), что естественным образом влияет на получаемые результаты, весьма затрудняя их сравнительный анализ. Также существует сложность в идентификации микропластика в пробах. Широко используемые для этого методы определения химического состава полимерных частиц (спектрометрические, газовой хроматографии, спектроскопические и др.), хотя и являются наиболее достоверными, имеют ряд своих ограничений. Помимо аналитических, одним из базовых методов является световая микроскопия, применяемая для визуальной идентификации полимерных частиц на макроразмерной шкале [28, 29]. В 2010 г. был предложен метод окраски микропластика раствором Нильского красного с дальнейшим анализом проб под эпифлуоресцентным микроскопом [30]. Данный метод до настоящего времени не потерял актуальности и используется в исследованиях подобного рода [31–34], с последующим контролем части выборки другими методами.

Цель настоящей работы — определить количество полимерных частиц, поступающих на поверхность земли с твердыми атмосферными осадками в северо-западной части Кольского полуострова в холодный период года.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в северо-западной части Кольского полуострова от нижнего течения р. Вороньей (каскад Серебрянских ГЭС) на востоке до устья р. Лотты (Верхнегуломское водохранилище) на западе, от истоков р. Колы (правые притоки р. Орловки и р. Валмы) до устья р. Кицы на юге и в окрестности г. Мур-

манска. Ранее в северо-западной части Кольского полуострова по концентрации нерастворимых частиц в твердых атмосферных осадках нами были выделены фоновые районы, а также импактный район [35].

Импактный район включает в себя г. Мурманск, ближайшие к нему населенные пункты, транспортные узлы (морские, железнодорожные и автомобильные), ТЭЦ, аэропорт. Фоновые районы — это единые природные ландшафтные комплексы, расположенные на различных орографических участках северо-западной части Кольского полуострова: восточный район объединяет тундры и лесотундры, расположенные к востоку от Кольского залива и парагенетически связанные с восточной частью Мурманского массива гранитоидов; западный район расположен к западу от южного колена Кольского залива в ландшафтах северной тайги, парагенетически приуроченных к Центрально-Кольскому тектоническому блоку; южный район расположен к югу от г. Мурманска в ландшафтах северной тайги, парагенетически связанных с восточной частью Лапландско-Сальютундровой тектонической зоны (рис. 1) [25, 35].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В зимний период 2020/21 г. (с декабря 2020 г. по апрель 2021 г.) проведены исследования твердых атмосферных осадков, выпадавших на северо-западе Кольского полуострова, пробы ежемесячно отбирались на 13 станциях (см. рис. 1, табл. 1). Для определения потока частиц на дневную поверхность земли было отобрано 117 проб



Рис. 1. Схема района работ. Кружками показаны станции отбора проб свежеснега, нумерация соответствует таблице 1

Fig. 1. Scheme of the work area. The circles show the sampling stations for freshly fallen snow, the numbering corresponds to table 1

( $n = 117$ ) свежевыпавшего снега (не менее двух проб на каждой станции за один снегопад). Для определения концентрации полимерных частиц в талой снеговой воде параллельные пробы, отобранные на одной станции, усреднялись.

Исследования проводились в безветренную погоду (скорость ветра  $< 5$  м/с), чтобы исключить ветровое загрязнение снежного покрова полимерами, отбирался только свежевыпавший снег. Отбор проб осуществлялся вдоль трех автомобильных магистралей: Мурманск–Серебрянская ГЭС (до пос. Туманный на востоке), Мурманск–Лотта (до устья р. Лотты на западе) и Мурманск–Санкт-Петербург (до 1315-го км на юге). Про-

Таблица 1

Станции отбора твердых атмосферных осадков

Table 1

Stations for sampling of solid atmospheric precipitation

№ п/п	Станции наблюдения	Северная широта	Восточная долгота
<i>Южный район</i>			
1	1315-й км трассы «Кола»	68°17,344'	33°28,436'
2	устье р. Кицы	68°38,016'	33°17,940'
<i>Восточный район</i>			
3	нижнее течение р. Вороньей	68°49,057'	35°33,747'
4	нижнее течение р. Эйч	68°48,754'	35°21,172'
5	нижнее течение р. Териберки	68°53,470'	34°21,251'
6	нижнее течение р. Канинтьярв	68°52,446'	34°12,130'
<i>Западный район</i>			
7	нижнее течение р. Пак	68°46,588'	32°21,606'
8	55-й км трассы «Лотта»	68°40,714'	31°54,635'
9	90-й км трассы «Лотта»	68°41,828'	31°22,771'
10	120-й км трассы «Лотта»	68°43,110'	30°39,401'
<i>г. Мурманск и его окрестности</i>			
11	г. Мурманск	68°56,549'	33°03,357'
12	устье р. Туломы	68°48,036'	32°34,239'
13	нижнее течение ручья Кильдинский	68°53,248'	33°17,835'

бы свежевыпавшего снега отбирались на расстоянии более 500 м от автомобильных дорог, против ветра (данное расстояние принято при исследовании снежного покрова, так как обеспечивает отсутствие какого-либо загрязнения снега движущимся автотранспортом [24, 35]). Отбор проб производился чистым пробоотборником из пищевой нержавеющей стали в тщательно промытые дистиллированной водой стеклянные емкости с притертыми крышками объемом 1,0–2,0 л. Чтобы исключить попадание уплотненного снега, в первую очередь определялась мощность свежевыпавшего снега методом вдавливания металлического кольца, затем отбирался верхний слой снега толщиной не более 3 мм, с постоянным визуальным контролем отбираемого материала [35]. Всегда фиксировалась площадь отбора проб снега с точностью до 1 см<sup>2</sup>.

Все реактивы (включая дистиллированную воду) предварительно были профильтрованы через ядерные фильтры. Использовалась только стеклянная и металлическая химическая посуда, тщательно вымытая профильтрованной дистиллированной водой. В лаборатории пробы снега подготавливались к фильтрации методом плавления в закрытых емкостях (чтобы исключить испарение талой воды) при комнатной температуре [24, 35]. Затем пробы талой снеговой воды фильтровали под вакуумом (при разрежении не более 0,2 атмосфер) в стеклянных фильтрационных насадках через специально подготовленные ядерные фильтры.

Для учета нерастворимых полимерных волокон ядерные фильтры (диаметр пор 0,45 мкм) предварительно протравливали в 3 % соляной кислоте в течение 3 суток с последующей промывкой дистиллированной водой, далее фильтры сушились в термостате при температуре 60 °С в эксикаторе [24, 35]. Непосредственно после фильтрации фильтры просматривались в чистой аналитической лаборатории под бинокулярным микроскопом МБС-10 при увеличениях 10–40х.

Для изучения микропластика использовались черные ядерные фильтры диаметром 2,2 см (диаметр пор 0,9 мкм), предварительно промытые несколькими порциями профильтрованной дистиллированной воды. Процесс фильтрации проб осуществлялся в стеклянных фильтрационных воронках под вакуумом. Непосредственно после его окончания в тех же воронках фильтры окрашивали раствором Нильского красного в *n*-гексане в течение 30 минут [33], после чего промывали раствором *n*-гексана и дистиллированной водой и заключали в иммерсионное масло на предметных стеклах. Далее препараты анализировали под эпифлуоресцентным микроскопом Carl Zeiss AxioImager D1 при увеличениях 50–100х. Все окрасившиеся волокна, а также фрагменты с максимальным размером более 100 мкм учитывались на всей площади фильтра, промеры каждой частицы проводились индивидуально. Фрагменты размером от 10 до 100 мкм учитывались по 9 размерным категориям с шагом в 10 мкм. Минимальный размер и шаг между размерными категориями были приняты в соответствии с ценой деления окуляр-микрометра. Частицы, которые нельзя было с уверенностью отнести к полимерам, при подсчете не учитывались.

При работе в лаборатории постоянно осуществлялся контроль чистоты используемой посуды, реактивов и фильтров.

Граничным значением для разделения микро- и макропластика нами было принято 1000 мкм, аналогично значению, предложенному в качестве одного из вариантов в работе [36].

Расчет потока полимерных частиц на поверхность земли проводился следующим образом: вначале определялось общее количество полимерных частиц в толще свежеснежного покрова, исходя из количества частиц в отобранном слое снега и мощности слоя свежеснежного покрова на каждой станции наблюдения. При этом вводилось допущение, что частицы распределялись равномерно по всему слою. Затем полученное количество частиц относилось к площади отбора свежеснежного покрова (площадь отбора изменялась в зависимости от плотности снега и составляла 3–6 м<sup>2</sup>). В заключение все пробы, отобранные в одном районе за один снегопад, усреднялись. В результате было получено 48 измерений ( $n = 48$ ).

#### **КОНЦЕНТРАЦИЯ НЕРАСТВОРИМЫХ ЧАСТИЦ В СВЕЖЕСНЕЖНОМ СНЕГЕ**

Концентрация твердых нерастворимых частиц в свежеснежном снеге на северо-западе Кольского полуострова (декабрь 2020 г. — апрель 2021 г.) изменялась от 1,86 до 7,91 мг/л (в среднем  $3,90 \pm 0,20$  мг/л,  $n = 48$ ) (табл. 2), что полностью соответствует фоновому содержанию нерастворимых частиц в свежеснежном снеге для северо-запада Кольского полуострова [35]. Во всех фоновых районах региона средние концентрации нерастворимых частиц за период наблюдений были сопоставимы между собой и не имели достоверных отличий (см. табл. 2). В импактном районе г. Мурманск концентрация нерастворимых частиц изменялась от 3,67 до 26,7 мг/л, в среднем —  $5,86 \pm 0,42$  мг/л ( $n = 17$ ), что в 1,5 раза больше, чем в сопредельных фоновых районах. В целом наблюдалось небольшое увеличение

Количество полимерных частиц в свежеснегавпавшем снеге в 2020–2021 гг.

Table 2

## Number of polymer particles in freshly fallen snow in 2020–2021

Месяцы	Концентрация нерастворимых частиц, мг/л	Количество полимерных волокон, л <sup>-1</sup>		Количество полимерных фрагментов, л <sup>-1</sup>
		длина >1 мм	длина <1 мм	
Декабрь 2020 г.	3,68 ± 0,25	57 ± 8	331 ± 97	3433 ± 1074
Январь 2021 г.	3,41 ± 0,17	62 ± 8	330 ± 52	4662 ± 1652
Февраль 2021 г.	4,01 ± 0,59	49 ± 11	1435 ± 416	9243 ± 2510
Март 2021 г.	4,08 ± 0,33	34 ± 7	772 ± 206	5413 ± 994
Апрель 2021 г.	4,93 ± 0,95	25 ± 15	491 ± 54	10913 ± 5295
Районы	Концентрация нерастворимых частиц, мг/л	Количество полимерных волокон, л <sup>-1</sup>		Количество полимерных фрагментов, л <sup>-1</sup>
		длина >1 мм	длина <1 мм	
Южный	3,56 ± 0,33	54 ± 9	592 ± 98	3667 ± 1171
Западный	3,35 ± 0,19	61 ± 9	944 ± 427	3609 ± 751
Восточный	3,19 ± 0,20	50 ± 10	703 ± 208	8239 ± 2668
г. Мурманск и его окрестности	5,86 ± 0,42	29 ± 4	638 ± 134	7766 ± 1401

концентрации аэрозольного вещества в твердых атмосферных осадках с декабря по апрель (см. табл. 2).

В составе нерастворимых частиц из твердых атмосферных осадков постоянно присутствовали волокна и фрагменты различных полимеров. Полимерные волокна длиной более 1 мм (далее в тексте макроволокон) встречались всех цветов (в том числе бесцветные и прозрачные), их длина достигала 7 см (в среднем  $3 \pm 0,3$  см,  $n = 1350$ ). Средняя длина волокон, не превышающих 1000 мкм (далее в тексте микроволокон), составляла  $757 \pm 34$  мкм (медиана 738, мода 779,  $n = 3400$ ). Толщина всех волокон изменялась от 5 до 20 мкм (в среднем  $16 \pm 0,3$  мкм,  $n = 4750$ ). Среднее количество макроволокон —  $48 \pm 5$  нитей в литре талой снеговой воды (л<sup>-1</sup>), среднее количество микроволокон —  $735 \pm 43$  (л<sup>-1</sup>) ( $n = 48$ ). Следовательно, количество макроволокон в литре талой снеговой воды почти в 20 раз меньше, чем количество микроволокон (см. табл. 2). Аномально большое количество полимерных волокон в твердых атмосферных осадках наблюдалось в февральские снегопады 2021 г. (в западном районе, см. табл. 2). В декабрьские и январские снегопады количество полимерных волокон в твердых атмосферных осадках было минимально. В целом с февраля по апрель количество полимерных волокон в твердых атмосферных осадках уменьшалось (см. табл. 2).

Обращает на себя внимание, что в г. Мурманске и его окрестностях количество полимерных волокон в твердых атмосферных осадках небольшое, а макроволокон в 1,5–2 раза меньше, чем в фоновых районах (см. табл. 2). Это может свидетельствовать о том, что городская инфраструктура не является поставщиком полимерных волокон в атмосферу.

Средний размер полимерных фрагментов  $62 \pm 2$  мкм (медиана 59 мкм, мода 64 мкм,  $n = 31000$ ), но они могут достигать 700 мкм. Количество полимерных фрагментов в литре талой снеговой воды в среднем составляло  $5890 \pm 884$  л<sup>-1</sup>, что почти на порядок больше, чем количество полимерных волокон. Максимальное количество полимерных фрагментов в твердых атмосферных осадках наблюдалось в февральские и апрельские снегопады. Количество полимерных фрагментов

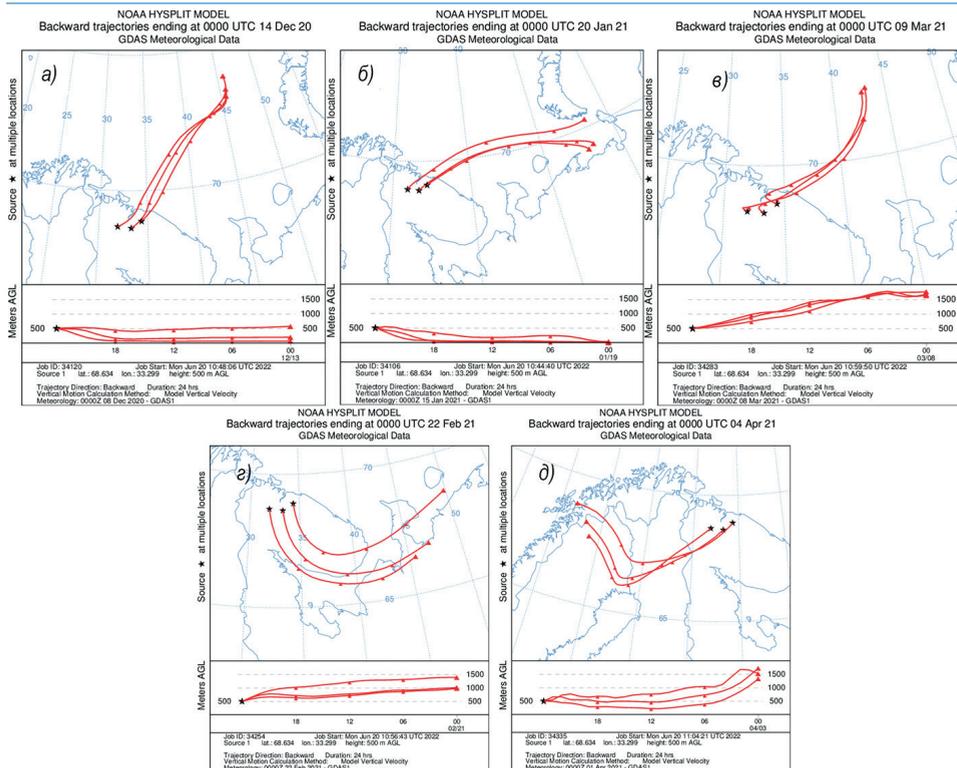


Рис. 2. Обратные траектории поступления воздушных масс, приносивших твердые атмосферные осадки на северо-запад Кольского полуострова, рассчитанные по программе NOAA HYSPLIT MODEL.

a) — декабрь 2020 г., б) — январь 2021 г., в) — март 2021 г., з) — февраль 2021 г., д) — апрель 2021 г.

Fig. 2. Reverse trajectories of air masses that brought solid atmospheric precipitation to the northwest of the Kola Peninsula, calculated using the NOAA HYSPLIT MODEL program.

a) — December 2020, б) — January 2021, в) — March 2021, з) — February 2021, д) — April 2021

в твердых атмосферных осадках, выпадавших в западном и южном районе, было в два раза меньше, чем в восточной части территории (включая г. Мурманск и его окрестности, см. табл. 2).

Максимальное количество полимерных частиц в твердых атмосферных осадках (>10000 л<sup>-1</sup>) наблюдались в февральские и апрельские снегопады, когда воздушные массы поступали с суши (рис. 2з, д). В феврале 2021 г. воздушные массы поступали с востока — через горло Белого моря и Кандалакшское побережье, в апреле 2021 г. — с юго-запада через вершину Ботнического залива и центральную Лапландию.

В декабре 2020 г., январе и марте 2021 г. воздушные массы, поступавшие со стороны Баренцева моря (см. рис. 2а, б, в), приносили твердые атмосферные осадки с меньшим количеством нерастворимых аэрозолей (в том числе различных полимерных частиц). При этом в марте 2021 г. воздушные массы, поступившие со стороны Баренцева моря, более суток находились над северо-западом Кольского полуострова, чем могут объясняться более высокие концентрации в твердых атмосферных осадках нерастворимых аэрозолей, в том числе и полимерных частиц (см. табл. 2).

### ПОТОК НЕРАСТВОРИМЫХ ЧАСТИЦ С ТВЕРДЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ

Суммарный поток твердых аэрозолей в период наблюдения на северо-западе Кольского полуострова не превышал  $5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$  за снегопад, в среднем —  $2,26 \pm 0,11 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ . Поток нерастворимых частиц в фоновых районах в среднем составлял  $1,85 \pm 0,08 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$  за снегопад ( $n = 66$ ), изменяясь от  $0,84$  до  $4,05 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ . В г. Мурманске и его окрестностях поток аэрозольных частиц был в два раза больше, чем в фоновых районах, и в среднем составлял  $3,62 \pm 0,42 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$  ( $n = 34$ ), изменяясь от  $1,67$  до  $11,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ .

В состав нерастворимых аэрозолей, выпадавших на поверхность земли, входили полимерные частицы, поток которых изменялся от  $165$  до  $3550 \text{ м}^{-2}$ , в среднем  $796 \pm 119 \text{ м}^{-2}$  ( $n = 117$ ) за один снегопад (макроволокна —  $24 \pm 2 \text{ м}^{-2}$ , микроволокна —  $70 \pm 16 \text{ м}^{-2}$ , полимерные фрагменты —  $678 \pm 98 \text{ м}^{-2}$ ).

В фоновых районах значение потока полимерных частиц с твердыми атмосферными осадками за один снегопад изменялось от  $100$  до  $2250 \text{ м}^{-2}$ , в среднем составляя  $610 \pm 89 \text{ м}^{-2}$  ( $n = 79$ ). В г. Мурманске и его окрестностях значения потока полимерных частиц изменялись в более широком диапазоне: от  $225$  до  $3300 \text{ м}^{-2}$ , в среднем —  $1010 \pm 114 \text{ м}^{-2}$  ( $n = 38$ ). Везде в составе полимерных частиц преобладали полимерные фрагменты, доля которых не опускалась ниже  $54\%$  (достигая  $97\%$  в отдельные снегопады), в среднем составляя  $87 \pm 2\%$  (в фоновых районах —  $85 \pm 3\%$ , в г. Мурманске и окрестностях —  $90 \pm 2\%$ ).

Таблица 3

Поток полимерных частиц с твердыми атмосферными осадками в 2020–2021 гг.

Table 3

#### Flux of polymer particles with solid atmospheric precipitation in 2020–2021

Месяцы	Поток нерастворимых частиц, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$	Поток полимерных волокон, $\text{м}^{-2}$		Поток полимерных фрагментов, $\text{м}^{-2}$
		длина $>1 \text{ мм}$	длина $<1 \text{ мм}$	
Декабрь 2020 г.	$2,11 \pm 0,07$	$31 \pm 2$	$41 \pm 9$	$466 \pm 166$
Январь 2021 г.	$1,90 \pm 0,20$	$29 \pm 4$	$35 \pm 3$	$463 \pm 145$
Февраль 2021 г.	$2,15 \pm 0,24$	$24 \pm 5$	$148 \pm 53$	$779 \pm 170$
Март 2021 г.	$2,46 \pm 0,20$	$17 \pm 3$	$87 \pm 20$	$633 \pm 98$
Апрель 2021 г.	$3,35 \pm 0,41$	$15 \pm 2$	$101 \pm 19$	$2139 \pm 903$
Районы	Поток нерастворимых частиц, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$	Поток полимерных волокон, $\text{м}^{-2}$		Поток полимерных фрагментов, $\text{м}^{-2}$
		длина $>1 \text{ мм}$	длина $<1 \text{ мм}$	
Южный	$2,09 \pm 0,12$	$31 \pm 5$	$57 \pm 11$	$327 \pm 75$
Западный	$1,77 \pm 0,06$	$31 \pm 4$	$76 \pm 9$	$544 \pm 61$
Восточный	$1,72 \pm 0,16$	$20 \pm 4$	$59 \pm 14$	$687 \pm 96$
г. Мурманск и его окрестности	$3,62 \pm 0,42$	$16 \pm 2$	$75 \pm 14$	$926 \pm 110$

В целом с декабря 2020 г. по апрель 2021 г. поступление нерастворимых аэрозолей на поверхность земли увеличивалось (табл. 3), а поступление полимерных макроволокон уменьшалось. Аномально большое поступление на поверхность земли полимерных волокон произошло в февральские снегопады 2021 г. (более  $170 \text{ м}^{-2}$ ), в декабрьские и январские снегопады количество поступающих полимерных волокон в  $1,5$ – $2$  раза меньше, чем в другие зимние месяцы (см. табл. 3).

Резко аномальным был апрель 2021 г. когда на один  $\text{м}^2$  поверхности земли поступало более  $2200$  полимерных частиц (из них  $95\%$  составляли фрагменты), в другие зимние месяцы количество поступающих на поверхность земли полимерных частиц не превышало  $1000 \text{ м}^{-2}$  (при этом достоверных отличий не было, см. табл. 3).

Если в фоновых районах на поверхность земли поступление полимерных макроволокон было больше, чем это наблюдалось в г. Мурманске и его окрестностях, то полимерных фрагментов в городской инфраструктуре выпадало в 1,5–3 раза больше, чем в фоновых районах северо-запада Кольского полуострова.

В целом если в г. Мурманске и его окрестностях за один снегопад на один м<sup>2</sup> поверхности земли в среднем выпадало более 1000 полимерных частиц, то в фоновых районах на единицу площади их поступало в среднем на 30 % меньше.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Опираясь на полученные данные и известное количество снегопадов в регионе (табл. 4), можно оценить общее количество полимерных частиц, поступающих на поверхность земли с твердыми атмосферными осадками. Так, на северо-западе Кольского полуострова холодная часть года, в течение которой преимущественно выпадают твердые атмосферные осадки, начинается во второй декаде октября и заканчивается в первой декаде мая [25]. Первый снег в 2020 г. выпал 14 октября (отмечался по всему региону), последний — 28–29 мая 2021 г. Продолжительность снежного сезона составила 226–227 суток. За 5 месяцев (декабрь–апрель 2020–2021 гг.) на северо-западе Кольского полуострова в среднем наблюдалось  $69 \pm 3$  снегопадов ( $n = 600$ ), в фоновых районах —  $74 \pm 3$  ( $n = 450$ ), в импактном районе —  $65 \pm 1$  ( $n = 150$ ). Наибольшее количество снегопадов произошло в январе 2021 г., наименьшее — в декабре 2020 г. и апреле 2021 г. (см. табл. 4).

Исходя из полученных данных, можно с уверенностью утверждать, что за 5 месяцев на один км<sup>2</sup> северо-запада Кольского полуострова поступало от 4 до 36 млрд полимерных частиц, в среднем  $12,7 \pm 3,2$  млрд на один км<sup>2</sup> ( $n = 117$ ). Следовательно, на изученную часть северо-запада Кольского полуострова поступление полимерных частиц с твердыми атмосферными осадками за зимний сезон 2020/21 г. можно оценить в сотни триллионов частиц ( $300\text{--}400 \cdot 10^{12}$  частиц). Из них 79–91 % — это полимерные фрагменты, 7–14 % — полимерные микроволокна, на долю полимерных макроволокон приходится около 4 %.

Как уже было отмечено выше, работ по микропластику в снежном покрове в мировой литературе недостаточное количество. Единственная до настоящего времени работа, в которой приведены фоновые значения концентрации микропластика в снежном покрове Арктики, принадлежит М. Bergmann с соавторами [15]. В ней представлены данные по содержанию микропластика в снежном покрове различных географических районов Европы и Арктики (исследовался снежный покров дрейфующих льдин в проливе Фрама, на ледниках архипелага Шпицберген, на о. Хельголанд, в Альпах и в окрестностях г. Бремена). При исследовании использовался метод FTIR (инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье), нижний предел определения полимерных частиц составлял 11 мкм. Во всех проанализированных пробах

*Таблица 4*

#### Количество снегопадов на северо-западе Кольского полуострова

*Table 4*

#### Number of snowfalls in the northwest of the Kola Peninsula

Месяц	Декабрь 2020 г.	Январь 2021 г.	Февраль 2021 г.	Март 2021 г.	Апрель 2021 г.
Среднее	12 ± 2	18 ± 3	13 ± 2	14 ± 2	12 ± 2
Диапазон	7–17	11–20	6–17	7–17	10–16

были обнаружены полимерные фрагменты (диаметром  $<100$  мкм) и волокна (длиной от 63 мкм до 14 мм). По приведенным данным, в снежном покрове Арктики среднее количество микропластика составляло  $1,76 \pm 1,58 \cdot 10^3$  л<sup>-1</sup>, что на порядок меньше, чем на острове Хельголанд ( $17,6 \cdot 10^3$  л<sup>-1</sup>), в проливе Фрама ( $14,4 \cdot 10^3$  л<sup>-1</sup>) и в снежном покрове Европы ( $24,6 \pm 18,6 \cdot 10^3$  л<sup>-1</sup>). Максимальные концентрации микропластика были зафиксированы в Баварских Альпах ( $154 \cdot 10^3$  л<sup>-1</sup>). В работе обоснована связь концентрации микропластика с направлением переноса воздушных масс и проведена оценка потока полимерных частиц на поверхность земли. По полученным данным и годовому выпадению твердых атмосферных осадков поток полимерных частиц на поверхность земли составил: высокогорные районы Альп —  $66 \pm 60$  м<sup>-2</sup>, пролив Фрама —  $8,8 \pm 7,9$  м<sup>-2</sup>, архипелаг Шпицберген —  $1,4 \pm 0,4$  м<sup>-2</sup>.

Необходимо отметить ряд работ по содержанию микропластика в высокогорных областях, свидетельствующих о воздушном переносе полимерных частиц. В апреле-мае 2019 г. на горе Эверест (высота отбора проб более 8000 м н. у. м.) количество частиц микропластика в снегу варьировало от 3 до 119 л<sup>-1</sup>, в среднем  $30 \pm 11$  л<sup>-1</sup> (размер от 36 до 3800 мкм [19]). В снежном покрове Тибетского плато (высота отбора проб 5776 м н. у. м.) — 22 л<sup>-1</sup> (размер от 10 до 5000 мкм [18]). В сентябре 2019 г. в итальянских Альпах —  $2,32 \pm 0,96$  (средний размер  $339 \pm 103$  мкм, от 50 до 1910 мкм) [17]. В Пиренейских горах в течение 5 месяцев отбирали пробы снега на двух станциях раз в месяц [22]. В пробах присутствовали частицы микропластика, среди которых преобладали фрагменты размером  $<50$  мкм и волокна длиной 100–300 мкм. Поток полимерных частиц в среднем составлял 365 м<sup>-2</sup> в день (фрагментов 249 м<sup>-2</sup>, волокон 44 м<sup>-2</sup>) [22].

Есть отдельные данные по потокам полимерных частиц в крупных городах. В г. Париже суточное поступление микропластика с атмосферными осадками (все виды осадков) оценивается в  $2,1\text{--}355,4$  м<sup>-2</sup> (10 % фрагменты, 90 % волокна, размер 200–1400 мкм [37]). В г. Гамбурге —  $136,5\text{--}512$  м<sup>-2</sup> (90 % фрагменты, 10 % волокна, размер 63–300 мкм [38]). В г. Дунгуане —  $175\text{--}313$  м<sup>-2</sup> (80 % волокна, размер 200–700 мкм [27]).

Необходимо еще раз отметить, что при отсутствии единого методологического подхода и методической базы сравнение литературных данных как между собой, так и с нашими результатами следует проводить очень аккуратно, на данный момент оно представляется нецелесообразным.

## ВЫВОДЫ

Количество полимерных волокон в свежеснежавшем снеге на северо-западе Кольского полуострова в большинстве случаев небольшое, что свидетельствует об отсутствии существенного загрязнения полимерными волокнами снежного покрова исследуемого района. Так, количество полимерных волокон в талой снеговой воде на северо-западе Кольского полуострова в среднем составляло  $783 \pm 48$  л<sup>-1</sup> ( $n = 48$ ). В составе полимерных волокон резко преобладали микроволокна, количество которых в среднем составляло  $735 \pm 43$  л<sup>-1</sup> ( $n = 48$ ). Концентрация полимерных фрагментов была в среднем  $5890 \pm 884$  л<sup>-1</sup> ( $n = 48$ ), что в 8 раз больше, чем количество полимерных волокон.

Данные о потоках полимерных частиц на поверхность земли с твердыми атмосферными осадками на северо-западе Кольского полуострова получены впервые.

Выделим главное:

1. Поток полимерных частиц со свежеснежившим снегом в среднем составлял  $796 \pm 119 \text{ м}^{-2}$  за снегопад ( $n = 48$ ), из них полимерных макроволокон —  $24 \pm 2 \text{ м}^{-2}$  ( $n = 48$ ), полимерных микроволокон —  $70 \pm 16 \text{ км}^{-2}$  ( $n = 48$ ), полимерных гранул —  $678 \pm 98 \text{ м}^{-2}$  ( $n = 48$ ).

2. За холодный период года поступление полимерных частиц на поверхность земли северо-запада Кольского полуострова в среднем составляло  $12,7 \pm 3,2$  млрд на  $\text{км}^2$  ( $n = 117$ ), что дает основание оценить общее поступление полимерных частиц с твердыми атмосферными осадками на исследованную часть региона в 300–400 триллионов.

Если используемые в быту и в промышленности различные полимеры сами по себе являются экологически нейтральными (в большинстве случаев), то полимерные микрочастицы (возможно, только субколлоидного размера), попадая в водную среду, могут представлять угрозу из-за своих гидрофильных и гидрофобных свойств, так как на поверхности микронных и субмикронных частиц не просто накапливаются различные вещества (в том числе и поллютанты), но и происходит образование связей с химическими соединениями, опасными для жизнедеятельности биологических объектов.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ РАН (номер госрегистрации 121091600105-4 (16.09.2021), ГЗ — FMEE-2021-0029 (0188-2021-0029)).

**Competing interests.** The authors declare the absence of competing interests.

**Funding.** The study was carried out within the framework of the state task of the Murmansk marine biological institute RAS (registration number 121091600105-4 (16.09.2021), ГЗ — FMEE-2021-0029 (0188-2021-0029)).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Plastics Europe, 2021. Plastics-the facts 2021: An analysis of European plastics production, demand and waste data. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (дата посещения 05.07.2022).
2. *Carpenter E.J., Smith K.L.Jr.* Plastics on the Sargasso sea surface // *Science*. 1972. V. 175. P. 1240–1241. Doi: 10.1126/science.175.4027.1240. PMID: 5061243.
3. *Kershaw P.J.* Marine plastic debris and microplastics global lessons and research to inspire action and guide policy change. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2016. 192 p.
4. *Alimi O.S., Budarz J., Hernandez L.M., Tufenkji N.* Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport // *Environmental Science and Technology*. 2018. V. 52. P. 1704–1724.
5. *Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S.* The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review // *Environmental Pollution*. 2013. V. 178. P. 483–492.
6. *Galloway T.S.* Micro- and Nano-plastics and Human Health // *Bergmann M., Gutow L., Klages M.* (eds). *Marine Anthropogenic Litter*. Berlin: Springer, 2015. P. 343–367. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_13).
7. *Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W.G., McGonigle D., Russell A.E.* Lost at Sea: Where Is All the Plastic? // *Science*. 2004. V. 304 (5672). P. 838–838. doi:10.1126/science.1094559.
8. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (Kershaw P.J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP. 2015. № 90. 96 p.

9. Bagaev A., Esiukova E., Litvinyuk D., Chubarenko I., Veerasingam S., Venkatachalapathy R., Verzhetskaya L. Investigations of plastic contamination of seawater, marine and coastal sediments in the Russian seas: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. V. 28. № 25. P. 32264–32281. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14183-z>.
10. Bergmann M., Wirzberger V., Krumpfen T., Lorenz C., Primpke S., Tekman M.B., Gerds G. High quantities of microplastic in Arctic deep-sea sediments from the HAUSGARTEN Observatory // *Environmental Science and Technology*. 2017. V. 51. P. 11000–11010.
11. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Гусева А.В., Шалунова Е.П., Мартинсон К.Д., Тихонова Д.А. Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и грунтах прибрежной территории Невской губы Финского залива // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47. № 4. С. 1–9. doi: 10.31857/S0321059620040148.
12. Li J., Liu H.J.P., Chen J.P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // *Water Research*. 2018. V. 137. P. 362–374.
13. Kim Y.N., Yoon J.-H., Kim K.-H. Microplastic contamination in soil environment — a review // *Soil Science Annual*. 2020. V. 71. P. 300–308. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131646>.
14. Bianco A., Passananti M. Atmospheric Micro and Nanoplastics: An Enormous Microscopic Problem // *Sustainability*. 2020. V. 12. № 18. P. 7327.
15. Bergmann M., Mützel S., Primpke S., Tekman M.B., Trachsel J., Gerds G. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic // *Science Advances*. 2019. V. 5. (8), eaax1157. URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1157> (дата посещения 05.07.2022).
16. Peeken I., Primpke S., Beyer B., Gutermann J., Katlein C., Krumpfen T., Bergmann M., Hehemann L., Gerds G. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic // *Nature Communications*. 2018. V. 9. P. 1505.
17. Parolini M., Antonioli D., Borgogno F., Gibellino M.C., Fresta J., Albonico C., De Felice B., Canuto S., Concedi D., Romani A., Rosio E., Gianotti V., Laus M., Ambrosini R., Cavallo R. Microplastic Contamination in Snow from Western Italian Alps // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. V. 18. P. 768. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020768>.
18. Zhang Y., Gao T., Kang S., Allen S., Luo X., Allen D. Microplastics in glaciers of the Tibetan Plateau: Evidence for the long-range transport of microplastics // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 758. P. 143634.
19. Napper I.E., Davies B.F.R., Clifford H., Elvin S., Koldewey H.J., Mayewski P.A., Miner K.R., Potocki M., Elmore A.C., Gajurel A.P., Thompson R.C. Reaching new heights in plastic pollution — preliminary findings of microplastics on Mount Everest // *One Earth*. 2020. V. 3. P. 621–630. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.020>
20. Walle H.J., Griffiths C.M., Waluda S.E., Thorpe I., Loaiza B., Moreno C.O., Pacherras K.A., Hughes C.L. Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 598. P. 220–227.
21. Can-Güven E. Microplastics as emerging atmospheric pollutants: a review and bibliometric analysis // *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2020. V. 14. P. 203–215. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00926-3>.
22. Allen S., Allen D., Phoenix V.R., Le Roux G., Jiménez P.D., Simonneau A., Binet S., Galop D. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment // *Nature Geoscience*. 2019. V. 12. P. 339–344.
23. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
24. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигацкий А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. № 75. С. 106–118.
25. Митяев М.В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. 226 с.
26. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande-Bret C., Tassin B. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. V. 104. P. 290–293.

27. Cai L., Wang J., Peng J., Tan Z., Zhan Z., Tan X., Chen Q. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24. P. 24928–24935.
28. Hengstmann E., Fischer E.K. Nile red staining in microplastic analysis — proposal for a reliable and fast identification approach for large microplastics // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. V. 191. P. 612. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7786-4>.
29. Nel H.A., Chetwynd A.J., Kelleher L., Lynch I., Mansfield I., Margenat H., Onoja S., Oppenheimer P.G., Smith G.H.S., Krause S. Detection limits are central to improve reporting standards when using Nile red for microplastic quantification // *Chemosphere*. 2021. V. 263. P. 127953.
30. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. V. 62. P. 1596–1605.
31. Erni-Cassola G., Gibson M.I., Thompson R.C., Christie-Oleza J.A. Lost, but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1mm to 20µm) in Environmental Samples // *Environmental Science & Technology*. 2017. V. 51. P. 13641–13648. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04512>.
32. Maes T., Jessop R., Wellner N., Haupt K., Mayes A.G. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>.
33. Shim W.J., Song Y.K., Hong S.H., Jang M. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. V. 113. P. 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.049>.
34. Tamminga M., Hengstmann E., Fischer E.K. Nile red staining as a subsidiary method for microplastic quantification: a comparison of three solvents and factors influencing application reliability // *SDRP Journal of Earth Sciences and Environment Studies*. 2017. V. 2. Issue 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.15436/JESES.2.2.1>.
35. Митяев М.В., Герасимова М.В., Рыжик И.В., Ишкуллова Т.Г. Нерастворимые фракции аэрозолей и тяжелых металлов в свежеевыпавшем снеге на северо-западе Кольского полуострова в 2018 г. // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 3. С. 307–318. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-386.
36. Hartmann N.B., Hüffer T., Thompson R.C., Hassellöv M., Verschoor A., Daugaard A.E., Rist S., Karlsson T., Brennholt N., Cole M., Herrling M.P., Hess M.C., Ivleva N.P., Lusher A.L., Wagner M. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for A Definition and Categorization Framework for Plastic Debris // *Environmental Science and Technology*. 2019. V. 53. P. 1039–1047.
37. Dris R., Gasperi J., Rocher V., Saad M., Renault N., Tassin B. Microplastic contamination in an urban area: a case study in greater Paris // *Environmental Chemistry*. 2015. V. 12. P. 592. <https://doi.org/10.1071/en14167>.
38. Klein M., Fischer E.K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 685. P. 96–103.

## REFERENCES

1. PlasticsEurope, 2021. Plastics-the facts 2021: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Available at: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (accessed 05.07.2022).
2. Carpenter E.J., Smith K.L. Jr. Plastics on the Sargasso sea surface. *Science*. 1972, 175: 1240–1241. doi: 10.1126/science.175.4027.1240. PMID: 5061243.
3. Kershaw P.J. Marine plastic debris and microplastics global lessons and research to inspire action and guide policy change. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2016: 192 p.
4. Alimi O.S., Budarz J., Hernandez L.M., Tufenkji N. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environmental Science and Technology*. 2018, 52: 1704–1724.

5. *Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S.* The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental Pollution*. 2013, 178: 483–492.
6. *Galloway T.S.* Micro- and Nano-plastics and Human Health. *Bergmann M., Gutow L., Klages M. (eds). Marine Anthropogenic Litter*, Berlin: Springer, 2015: 343–367. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_13).
7. *Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W.G., McGonigle D., Russell A.E.* Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*. 2004, 304 (5672): 838–838. doi:10.1126/science.1094559.
8. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. (Kershaw P.J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP. 2015, 90: 96 p.
9. *Bagaev A., Esiukova E., Litvinyuk D., Chubarenko I., Veerasingam S., Venkatachalapathy R., Verzhvskaya L.* Investigations of plastic contamination of seawater, marine and coastal sediments in the Russian seas: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, 28 (25): 32264–32281. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14183-z>.
10. *Bergmann M., Wirzberger V., Krumpfen T., Lorenz C., Primpke S., Tekman M.B., Gerdts G.* High quantities of microplastic in Arctic deep-sea sediments from the HAUSGARTEN Observatory. *Environmental Science and Technology*. 2017, 51: 11000–11010.
11. *Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Guseva A.V., Shalunova E.P., Martinson K.D., Tihonova D.A.* Study of microplastic particles in water, sediments and soil of the coastal area of the Neva Bay og the Gulf of Finland. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2020, 47: 1–9. [In Russian]. doi: 10.31857/S0321059620040148.
12. *Li J., Liu H.J.P. Chen J.P.* Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*. 2018, 137: 362–374.
13. *Kim Y.N., Yoon J.-H., Kim K.-H.* Microplastic contamination in soil environment — a review. *Soil Science Annual*. 2020, 71: 300–308. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131646>.
14. *Bianco A., Passananti M.* Atmospheric Micro and Nanoplastics: An Enormous Microscopic Problem. *Sustainability*. 2020, 12 (18): 7327.
15. *Bergmann M., Mützel S., Primpke S., Tekman M.B., Trachsel J., Gerdts G.* White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances*. 2019, 5 (8): 1157.
16. *Peeken I., Primpke S., Beyer B., Gutermann J., Katlein C., Krumpfen T., Bergmann M., Hehemann L., Gerdts G.* Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Communications*. 2018, 9: 1505.
17. *Parolini M., Antonioli D., Borgogno F., Gibellino M.C., Fresta J., Albonico C., De Felice B., Canuto S., Concedi D., Romani A., Rosio E., Gianotti V., Laus M., Ambrosini R., Cavallo R.* Microplastic contamination in snow from Western Italian Alps. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021, 18: 768. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020768>.
18. *Zhang Y., Gao T., Kang S., Allen S., Luo X., Allen D.* Microplastics in glaciers of the Tibetan Plateau: Evidence for the long-range transport of microplastics. *Science of the Total Environment*. 2021, 758: 143634.
19. *Napper I.E., Davies B.F.R., Clifford H., Elvin S., Koldewey H.J., Mayewski P.A., Miner K.R., Potocki M., Elmore A.C., Gajurel A.P., Thompson R.C.* Reaching new heights in plastic pollution — preliminary findings of microplastics on Mount Everest. *One Earth*. 2020, 3: 621–630.
20. *Walle H.J., Griffiths C.M., Waluda S.E., Thorpe I., Loaiza B., Moreno C.O., Pacherras K.A., Hughes C.L.* Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research. *Science of the Total Environment*. 2017, 598: 220–227.
21. *Can-Güven E.* Microplastics as emerging atmospheric pollutants: a review and bibliometric analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2020, 14: 203–215. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00926-3>.
22. *Allen S., Allen D., Phoenix V.R., Le Roux G., Jiménez P.D., Simonneau A., Binet S., Galop D.* Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*. 2019, 12: 339–344.

23. *Shevchenko V.P. Vliyaniye aerorozolej na sredu i morskoe osadkonakopleniye v Arktike*. Impact of aerosols on the environment and marine sedimentation in the Arctic. Moscow: Nauka, 2006: 226 p. [In Russian].
24. *Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Shtain R., Foryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krivs M., Novigatskiy A.N., Sokolov V.T., Philippov A.S., Haas H.* Distribution and composition of particulate matter in the Arctic snow. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 75: 106–118. [In Russian].
25. *Mityaev M.V. Murmanskoe poberezh'ye (geologo-geomorfologicheskie i klimaticheskie osobennosti, sovremennyye geologicheskiye processy)*. Murmansk coast (geological-geomorphological and climatic features, modern geological processes). Apatity: Izd. KNC RAN, 2014: 226 p. [In Russian].
26. *Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande-Bret C., Tassin B.* Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*. 2016, 104: 290–293.
27. *Cai L., Wang J., Peng J., Tan Z., Zhan Z., Tan X., Chen Q.* Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017, 24: 24928–24935.
28. *Hengstmann E., Fischer E. K.* Nile red staining in microplastic analysis — proposal for a reliable and fast identification approach for large microplastics. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019, 191: 612. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7786-4>.
29. *Nel H.A., Chetwynd A.J., Kelleher L., Lynch I., Mansfield I., Margenat H., Onoja S., Oppenheimer P.G., Smith G.H.S., Krause S.* Detection limits are central to improve reporting standards when using Nile red for microplastic quantification. *Chemosphere*. 2021, 263: 127953.
30. *Andrady A.L.* Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. 2011, 62: 1596–1605.
31. *Erni-Cassola G., Gibson M.I., Thompson R.C., Christie-Oleza J.A.* Lost, but found with Nile Red: a novel method for detecting and quantifying small microplastics (1mm to 20µm) in environmental samples. *Environmental Science & Technology*. 2017, 51: 13641–13648. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04512>.
32. *Maes T., Jessop R., Wellner N., Haupt K., Mayes A.G.* A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*. 2017, 7: 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>.
33. *Shim W.J., Song Y.K., Hong S.H., Jang M.* Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Marine Pollution Bulletin*. 2016, 113: 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.049>.
34. *Tammaing M., Hengstmann E., Fischer E.K.* Nile red staining as a subsidiary method for microplastic quantification: a comparison of three solvents and factors influencing application reliability // *SDRP Journal of Earth Sciences and Environment Studies*. 2017, 2, 2: 165–172. <https://doi.org/10.15436/JESES.2.2.1>.
35. *Mityaev M.V., Gerasimova M.V., Ryzhik I.V., Ishkulova T.G.* Insoluble fractions of aerosols and heavy metals in fresh snow in the northwest of the Kola Peninsula in 2018. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2019, 59: 307–318. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-386.
36. *Hartmann N.B., Hüffer T., Thompson R.C., Hassellöv M., Verschoor A., Dagaard A.E., Rist S., Karlsson T., Brennholt N., Cole M., Herrling M.P., Hess M.C., Ivleva N.P., Lusher A.L., Wagner M.* Are We Speaking the Same Language? Recommendations for A Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science and Technology*. 2019, 53: 1039–1047.
37. *Dris R., Gasperi J., Rocher V., Saad M., Renault N., Tassin B.* Microplastic contamination in an urban area: a case study in greater Paris. *Environmental Chemistry*. 2015, 12: 592. <https://doi.org/10.1071/en14167>.
38. *Klein M., Fischer E.K.* Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *Science of the Total Environment*. 2019, 685: 96–103.