

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДЫ В БУТЫЛКАХ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ПОЛИМЕРАМИ

Шерри А. Мейсон \*, Виктория Уэлч, Джозеф Нератко

Государственный университет Нью-Йорка во Фредонии, Факультет геологии и наук об окружающей среде

\*корреспондент

### РЕЗЮМЕ ПРОЕКТА

Протестировано 259 отдельных бутылок из 27 различных партий 11 брендов

о Куплено в 19 местах в 9 странах

93% воды в бутылках показали некоторые признаки

микропластического загрязнения

о После учета возможного фонового (лабораторного) загрязнения

Среднее из 10,4 микропластичных частиц > 100 мкм на литр

бутилированной воды

о Подтверждено FTIR-спектроскопическим анализом

о В два раза больше, чем в предыдущем исследовании по водопроводной воде

Включая более мелкие частицы (6,5–100 мкм), в среднем 325 микропластических частиц на литр

о Идентифицировано только с помощью

Nile Red

о Нет спектроскопического

подтверждения

о Диапазон от 0 до более 10000 микропластичных частиц на

литр или 95% - это частицы размером от 6,5 до 100 мкм

Для частиц > 100 мкм:

о о Фрагменты были наиболее распространенной морфологией (66%), за которыми следовали волокна

о Полипропилен был самым распространенным полимером (54%)

Соответствует обычному пластику, используемому для крышки бутылки

о 4% частиц показали наличие промышленных смазок

Данные предполагают, что загрязнение, по крайней мере, частично исходит от упаковки и / или самого процесса розлива.

### ВВЕДЕНИЕ

Пластик определяется как любой синтетический или полусинтетический полимер с термопластичными или терморективными свойствами, который может быть синтезирован из углеводородного сырья или биомассы (UNEP 2016). С момента выхода на потребительскую стадию производство пластмасс демонстрирует экспоненциальный рост, увеличившись с миллиона тонн в 1945 году до более 300 миллионов тонн в 2014 году (PlasticsEurope 2015). Некоторые из особенностей пластика, которые делают его настолько привлекательным с точки зрения производства, вызывают обеспокоенность, когда речь заходит о его воздействии на окружающую среду. Это очень легкий вес, позволяющий легко транспортировать его на большие расстояния, и он долговечен, устойчив к разрушению и биологическому разложению. Его долговечность неразрывно связана с его химической структурой. Будучи составленным в основном, если не полностью, из углеводородных цепей, отсутствие двойных связей или других функциональных групп обеспечивает присущую его молекулам стабильность, а его синтетическая природа означает, что подавляющее большинство микроорганизмов не эволюционировали для использования пластмассы в качестве источника пищи. Таким образом, в то время как пластик распадается на все более мелкие частицы посредством фотоокислительных механизмов, фундаментальные молекулярные

структуры материала очень мало меняются в течение всего этого процесса. Пластмассы превращаются в микропластики, превращаются в нанопластики, но все они представляют собой пластики, но их размер становится все меньше и меньше, что позволяет легче их проглатывать и, возможно, даже пересекать желудочно-кишечный тракт для переноса по всему живому организму (Brennecke et al. 2015, Sharma and Chatterjee 2017 ).

С ростом производства пластмасс увеличились загрязнения пластмассой внешней среды. Первые сообщения относятся к началу 1970-х годов (Carpenter & Smith 1972) и наиболее широко распространены в мировом океане, но в последнее время загрязнение пластмассой было обнаружено в пресноводных озерах, внутренних морях, реках, водно-болотных угодьях и организмах от планктона до китов (и почти каждый вид между ними) (Horton et al. 2017, Lusher et al. 2017). Поскольку его повсеместное распространение во внешней среде увеличивается, это побудило все больше исследователей исследовать различные расходные материалы на наличие пластмассы. Рыба, мидии, пиво и морская соль являются одними из самых известных (Lusher et al. 2017, Yang et al. 2015, Liebezeit и Liebezeit 2014, Van Cauwenberghe and Janssen 2014). Наша лаборатория провела первое в истории исследование пластического загрязнения водопроводной воды из глобальных источников (всего 159 проб из семи географических регионов, охватывающих пять континентов) (Kosuth et al. 2018).

По мере расширения исследований в области загрязнения пластиком, методы отбора проб и анализа также постоянно развиваются. В водной среде наиболее часто используемыми методами являются уменьшение объема (с использованием нейстоновых сетей) или объемный отбор проб с последующим разделением по плотности, фильтрацией / просеиванием и визуальной идентификацией (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Учитывая трудоемкий характер этих методов обработки образцов, а также возможность ошибочной идентификации с использованием одних только визуальных сигналов, одной из основных областей исследования загрязнения пластмасс (особенно на микро- и наноразмерном уровне) является разработка методов для высокой пропускной способности с повышенным полимерным подтверждением. Несколько недавних исследований подтвердили использование Nile Red (NR) в качестве точного красителя для быстрого обнаружения и количественного определения микропластиков с учетом их селективности адсорбции и флуоресцентных свойств. Maes et al. (2017) специально проверили преимущественную адсорбцию NR для полимерных материалов по отношению к обычным органическим (водоросли, морские водоросли, древесина и перья) и неорганическим (раковинам) загрязнителям окружающей среды. Как и Maes et al. (2017), Эрни-Кассола и соавт. (2017) подтвердили использование этого красителя с помощью анализа с использованием FTIR для проверки полимерного содержания флуоресцирующих частиц, и оба из своих усилий пришли к выводу, что NR можно использовать для быстрого обнаружения микропластиков без необходимости дополнительного спектрального анализа (тем самым уменьшая время, необходимое для анализа образца окружающей среды) (т. е. адсорбции только NR достаточно, чтобы идентифицировать частицу как полимерную по природе). Это также подтверждается включением этого метода в недавний обзор аналитических методологий для микропластического мониторинга, проведенный Renner et al. (2018).

Здесь мы представляем исследование, использующее Nile Red для обнаружения микропластика в 11 мировых брендах бутилированной воды. Всего было обработано 259 бутылок воды от 11 брендов

на 27 различных партиях (идентификационный номер, присвоенный производителем определенной производственной единице), приобретенных в 19 точках в 9 странах. Для 10 брендов мы протестировали по 2-3 лота каждая, в то время как для 1 бренда был протестирован только 1 лот. В каждой партии мы обычно тестировали 10 бутылок (объемом 500-600 мл каждая). Однако для одной партии несколько бутылок из кейса были конфискованы таможней, что позволило протестировать только 9 бутылок, в то время как для двух других партий объем воды на бутылку был значительно больше (0,750-2 л) и, следовательно, были обработаны только 4 (2 л) бутылки) или 6 бутылок (750 мл бутылки). Одна из партий воды в бутылках была упакована в стекло (Gerolsteiner, 750 мл, обработано 6 стеклянных бутылок); все остальные образцы были упакованы в пластик. У всех бутылок были пластиковые колпачки.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

### **Сбор образцов**

Пробные партии были закуплены с учетом географического разнообразия (представлены пять континентов), размера национального рынка упакованной питьевой воды (Китай, США, Бразилия, Индия, Индонезия, Мексика) и высокого потребления упакованной питьевой воды на душу населения (Ливан, Мексика, Таиланд, США). В число ведущих мировых брендов в этом исследовании вошли Aquafina, Dasani, Evian, Nestle Pure Life и San Pellegrino. Ведущими национальными брендами являются Aqua (Индонезия), Bisleri (Индия), Epura (Мексика), Gerolsteiner (Германия), Minalba (Бразилия) и Wahaha (Китай).

Так как многие марки бутилированной воды представляют собой просто фильтрованную муниципальную водопроводную воду, партии проб были приобретены в ряде мест, чтобы увеличить вероятность различных источников розлива. Например, случаи мексиканского бренда Epura были приобретены в Тихуане в штате Нижняя Калифорния, Рейносе на границе с Техасом (1200 миль к востоку от Тихуаны) и Мехико (1400 миль к югу от Тихуаны). Этот шаблон повторяется с другими брендами.

Розничная покупка, подготовка посылки и принятие в судходном офисе большинства типовых случаев были задокументированы с помощью видео и фотографии для подтверждения цепочки владения. Закупочная и отгрузочная документация была сохранена. Этот режим фото и видео документации не распространяется на шесть испытательных партий из Соединенных Штатов - Aquafina, Dasani, Nestle Pure Life, Gerolsteiner, Evian, San Pellegrino - которые были приобретены и отправлены в лабораторию через Amazon.com, а также на Gerolsteiner, приобретенным на месте в розничном магазине в непосредственной близости от лаборатории обработки.

### **Обработка образцов**

Бутылки в большинстве партий (9 из 11 брендов) поставлялись в контейнерах по 500-600 мл на бутылку, в то время как в 2 марках содержалось 0,75-2 л на бутылку. Для этих образцов по 500-600 мл на бутылку из партии было случайно выбрано 10 бутылок, в то время как для проб на 750 мл было выбрано 6 бутылок, а для образца объемом 2 л были выбраны 4 бутылки случайным образом и помещены под ламинарный поток вытяжного устройства. Находясь под вытяжным колпаком, каждая бутылка была открыта и был введен определенный

объем раствора Nile Red (приготовленного в ацетоне до 1 мг мл<sup>-1</sup>), чтобы получить рабочую концентрацию 10 мкг мл<sup>-1</sup>, и повторно закрыта крышкой. Nile Red адсорбируется на поверхности пластмасс, но не наиболее встречающихся в природе материалов<sup>1</sup>, и флуоресцирует при определенных длинах волн света. Бутылки оставляли для инкубации с введенным красителем в течение по меньшей мере 30 минут. Затем бутилированную воду фильтровали в вакууме через стекловолоконный фильтр (сорт Whatman 934-AH, диаметр 55 мм, пористость 1,5 мкм).

Фильтры исследовали под оптическим микроскопом (Leica EZ4HD, 8-40-кратный зум, встроенная 3-мегапиксельная камера), используя синий свет (Crime-Lite 2, 445-510 нм, Foster & Freeman), чтобы выявить флуоресценцию, которая была визуализирована с помощью оранжевого фильтра (Foster & Freeman, 529nm). Все частицы размером более ~ 100 мкм (которые достаточно велики, чтобы их можно было увидеть невооруженным глазом и перемещать с помощью пинцета) были сфотографированы, подсчитаны и напечатаны с учетом морфологии (фрагмент, волокно, шарик, пленка или пена). Кроме того, первые 3-5 частиц анализировали с помощью FTIR (PerkinElmer Spectrum Two ATR; от 450 см<sup>-1</sup> до 4000 см<sup>-1</sup>, 64 скана, разрешение 4 см<sup>-1</sup>), чтобы подтвердить идентичность полимера.

После удаления всех частиц > 100 мкм, фильтр с флуоресцентными частицами был сфотографирован (8-кратное увеличение) через оранжевый фильтр камеры (Foster & Freeman, диаметр 62 мм, 529 нм) в 4 отдельных квадрантах. Чтобы гарантировать, что фотографии квадранта не перекрываются, на фильтрах были сделаны идентификационные метки перед поворотом фильтра на 90 градусов, чтобы сделать последующую фотографию. Фактически, с учетом коэффициента масштабирования микроскопа, квадрантные фотографии не получили полного (100%) охвата фильтра. Каждый сфотографированный квадрант был проанализирован с использованием программы под названием «Galaxy Count», разработанной бывшим астрофизиком для этой конкретной цели и кратко описанной здесь. Учитывая флуоресцирующие частицы относительно нефлуоресцентного фона, «Galaxy Count» способен подсчитывать количество частиц (в виде ярких пятен), чтобы количественно определить количество более мелких микропластиков. Для этого оператор программного обеспечения устанавливает пороговое значение, которое используется для преобразования квадрантных изображений в черные (фоновый фильтр) и белые (флуоресцентные частицы). Затем программное обеспечение в цифровом виде подсчитывает количество белых пятен («звезд») на темном фоне («ночное небо»). При 8-кратном увеличении, в котором были сделаны фотографии квадранта, 1 пиксель был равен 6,5 мкм. Таким образом, хотя размер пор нашего фильтра составлял 1,5 мкм, наименьший размер частиц, который мы могли визуализировать с помощью комбинации фотографии и программного обеспечения, составлял 6,5 мкм. Конечно, могут быть частицы размером менее 6,5 мкм, но используемый здесь метод не сможет выявить их наличие. Из-за программной установки порогового значения все цифровые подсчеты проводились двумя разными исследователями, работающими независимо друг от друга, чтобы учесть возможную изменчивость.

Количество микропластов для частиц > 100 мкм (называемое «NR + FTIR-подтвержденные частицы») сообщается для каждой бутылки. Это те частицы, которые были дополнительно проанализированы FTIR и, таким образом, также сообщаются

---

<sup>1</sup> Nile Red абсорбирует липиды, хранящиеся в водорослях, но в более длительном масштабе времени, чем те, которые используются здесь, и при этом липиды не должны быть обнаружены в бутилированной воде..

типы полимеров. Более мелкие микропластичные частицы (6,5–100 мкм; называемые «частицы с меткой NR»), подсчитанные с использованием программного обеспечения «Galaxy Count», аналогичным образом сообщаются для каждой бутылки суммированием по четырем квадрантам (каждый квадрант сообщается как среднее значение в обоих исследованиях).

### **Обеспечение качества и контроль качества**

Обработка образцов проводилась в исследовательской лаборатории Mason площадью 400 кв. футов, которая в то время была закрыта для других исследовательских проектов, в новом научном центре Университета штата Нью-Йорк в кампусе Фредония. FTIR был недавно приобретен, так как был установлен лицензированным техником только за 2 недели до начала этого проекта. Тем не менее, проверочные тесты прибора проводились в начале каждого дня, чтобы обеспечить правильную работу прибора. Лаборатория была оснащена камерой Google Nest, которая записывала всю работу. Из-за ограничений хранилища программного обеспечения Nest, которое хранит видео только 30 дней позволяет всего 3 часа видеороликов, отснятый материал был сжат в виде серийной съемки с временным интервалом, что включало время непосредственно перед началом лабораторных операций в течение дня и сразу после лабораторных операций, прекращающихся на день. Нам не хватает записи ночных часов, когда лабораторные работы не проводились. Программное обеспечение Nest часто зависало в процессе создания роликов. Иногда камера Nest отключалась сама на короткое время. Работники лаборатории знали о камере и думали, что камера беспрерывно записывает.

Чтобы предотвратить / уменьшить потенциальное загрязнение во время обработки образца от внешних источников, таких как находящиеся в воздухе волокна, работа проводилась в ламинарном шкафу с воздушным потоком (производство Mott, Phoenix Controls, ежегодно обслуживаемое в сентябре), и рабочее пространство протиралось каждую неделю. Вся стеклянная посуда была накрыта часовым стеклом, когда она не использовалась, и тщательно промывалась между испытаниями. Фильтры проверяли под микроскопом перед использованием, и на протяжении всей экспериментальной процедуры надевали хлопчатобумажный лабораторный халат и смотровые перчатки без нитрилового порошка.

Относительно возможного лабораторного загрязнения, которое могло произойти в результате атмосферного осаждения, используемые химикаты, стеклянная посуда или другие аспекты среды тестирования, лабораторных заготовок, содержащие деионизированную воду (используемую для мытья всей стеклянной посуды) или ацетон (используемого для приготовления раствора Nile Red) ) были обработаны способом, идентичным самим образцам. Плотность частиц в образцах была уменьшена на основе средней плотности по всем лабораторным пробам.

Программное обеспечение «Galaxy Count» было создано специально для этого проекта. Чтобы проверить его точность, было создано 4 раствора с использованием DI воды, содержащей 0, 20, 50 или 100 полиэтиленовых микросфер (Cospheric, PE microsphere, D = 1,25 г мл<sup>-1</sup>, диаметр 75-90 мкм). Эти решения были созданы одним исследователем, но обработаны другим «слепым» методом исследования, идентичным самим образцам (инъекция NR, инкубация, фильтрация, фотографирование квадранта и

анализ с помощью программного обеспечения «Galaxy Count». Кроме того, анализ всех квадрантов фильтра с помощью программного обеспечения «Galaxy Count» для всех образцов проводился «вслепую» двумя отдельными исследователями. Эти два подсчета можно сравнивать друг с другом по точности, в дополнение к усреднению для сообщенных чисел.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Обзор

В общей сложности 259 отдельных бутылок от 11 различных марок и 27 различных партий были проанализированы на микропластичные частицы, разделенные на две фракции размера: так называемые «частицы, подтвержденные NR + FTIR», которые > 100 мкм, и «частицы, помеченные NR», которые составляют 6,5-100 мкм. Поскольку квадрантные фотографии не обеспечивают полного (100%) охвата фильтра, вероятно, что «частицы с меткой NR» недооценены. Поскольку отдельные флаконы содержали различные объемы воды, от 500 мл до 2 л, абсолютные значения для каждой бутылки и фракции размера были разделены на объем образца для расчета (необработанных) плотностей микропластика на литр (микропластичных частиц / л или MPP / л).

Тринадцать лабораторных заготовок с использованием лабораторной деионизированной воды или ацетона были обработаны с использованием методов, идентичных методам для образцов бутилированной воды. Для частиц FTIR (> 100 мкм) средняя плотность была равна 4,15 MPP / л, в диапазоне 0-14 MPP / л, в то время как в пределах меньших частиц с меткой NR (6,5–100 мкм) среднее значение плотности составляла 23,5 MPP / л, с диапазоном 7-47 MPP / л. Указанные микропластические плотности для образцов бутилированной воды рассчитываются (по размеру фракции) из сырых плотностей за вычетом среднего значения из лабораторных заготовок (таблица 1). Если сырые плотности имели меньшие или равные количества относительно лабораторных заготовок, их значения были установлены на ноль. Учитывая, что на квадрантные фотографии не было получено полного (100%) покрытия фильтра и что сырые плотности были уменьшены с помощью лабораторных проб, ожидаемые значения плотности, как ожидается, будут разумными, но консервативными, учитывая микропластические загрязнения. Общие плотности были рассчитаны путем суммирования по фракциям размера (таблица 1).

Семнадцать бутылок из 259 проанализированных бутылок (~ 7%) не показали микропластического загрязнения, превышающего возможное лабораторное влияние, что указывает на то, что 93% протестированной воды в бутылках показали некоторые признаки микропластического загрязнения. Плотности микропластического загрязнения довольно разнообразны: от 17 бутылок без загрязнения до одной бутылки, в которой было показано превышение 10000 микропластичных частиц на литр (таблица 1). Различия, наблюдаемые в отдельных бутылках, даже среди одной и той же партии и бренда, аналогичны тем, которые наблюдаются при отборе проб открытых водоемов (Yonkos et al. 2014). Образцы в такой выборке могут быть довольно случайными из-за большого количества факторов, которые могут влиять на возникновение пластиковых частиц (особенно в микромасштабе), таких как динамика частиц в жидкости, а также изменения в самом производственном процессе, приводя к большому разнообразию видимых образцов. Этот ошибочный подход подчеркивает необходимость в больших размерах выборки, например, используемых здесь, для усреднения по вариациям для получения реалистичного изображения.

Плотность микропластичных частиц по бутылкам и по разме  
ру для каждой марки и номера партии. Тире ук азывают в которых было обработано менее 10 бутылок

			Плотность микропластика (MPP / L) по бутылкам																													
Бренд	Номер лота	Место покупки	NR+FTIR подтвержденные частицы (>100 мкм)										NR меченые частицы (6.5-100 мкм)										Общая плотность (MPP/L)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aqua	IB 101119	Jakarta, Indonesia	6	8	8	4	11	9	4	9	3	6	127	52	55	57	12	0	0	0	0	0	133	60	62	62	23	9	4	9	3	6
Aqua	BB 311019 08:11 PSRL6	Bali, Indonesia	3	9	1	9	8	8	3	19	26	21	2	37	0	142	0	0	7	602	1466	4692	4	47	1	152	8	8	10	621	1492	4713
Aqua	BB 311019 09:50 STB1	Medan, Indonesia	0	1	3	9	8	0	6	36	8	0	36	94	30	43	41	0	25	3687	12	5	36	95	32	52	48	0	31	3722	20	5
Aquafina	Oct0719 0121PF100375	Amazon.com	10	8	14	8	24	14	20	28	10	14	87	37	74	35	132	313	139	1268	137	153	96	44	87	42	155	326	158	1295	146	166
Aquafina	BN7141A04117	Chennai, India	22	22	10	16	4	2	10	10	6	16	127	171	71	94	180	1	253	131	212	389	148	192	80	109	183	2	262	140	217	404
Bisleri	HE.B.No.229 (BM/AS)	Chennai, India	38	28	18	8	8	8	14	10	26	24	76	75	144	37	98	32	50	206	2163	5207	113	102	161	44	105	39	63	215	2188	5230
Bisleri	MU.B.No.298 (MS/AD)	Mumbai, India	14	8	12	6	8	12	2	12	6	10	66	8	17	125	6	20	0	1799	0	0	79	15	28	130	13	31	2	1810	6	10
Bisleri	SO.B.No.087 (AS/LB)	New Delhi, India	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	2	4	0	0	0
Dasani	Oct 0118NHBRB	Amazon.com	22	18	12	4	12	20	8	16	22	14	169	99	292	116	74	130	186	99	168	173	190	116	303	119	85	149	193	114	189	186
Dasani	P18NOV17CG3	Nairobi, Kenya	26	0	8	14	2	0	6	2	2	4	0	7	226	56	8	16	28	1	13	332	26	7	233	69	9	16	33	2	14	335
E-Pura	17.11.18	Mexico City, Mexico	9	11	38	26	31	38	36	4	4	28	2	0	946	1292	1167	667	2232	7	56	268	11	11	983	1318	1198	704	2267	11	60	296
E-Pura	14.10.18	Tijuana, Mexico	18	14	21	9	3	3	0	6	4	1	0	78	12	2	0	12	6	6	6	2	18	92	32	11	3	14	6	12	10	3
E-Pura	09.08.18	Reynosa, Mexico	0	0	0	1	--	--	--	--	--	--	0	0	0	148	--	--	--	--	--	0	0	0	149	--	--	--	--	--	--	--
Evian	PRD 03 21 2017 14:02	Amazon.com	18	18	26	10	38	24	22	20	40	46	239	207	156	176	98	222	105	212	153	148	256	224	181	185	135	245	126	231	192	193
Evian	PRD 05 24 17 11:29	Fredonia, NY, USA	4	0	2	0	0	2	2	2	4	0	253	0	77	29	3	50	1	47	96	15	256	0	78	29	3	51	2	48	99	15
Gerolsteiner	07.142018 2 07.07.2017	Fredonia, NY, USA	10	8	2	10	10	10	20	24	20	36	180	35	45	2	13	56	154	3431	4974	5071	189	42	46	11	22	65	173	3454	4993	5106
Gerolsteiner	NV No. AC-51-07269	Amazon.com	8	11	5	8	12	11	--	--	--	--	3	11	4	173	504	479	--	--	--	10	21	9	180	516	490	--	--	--	--	--
Minalba	FAB: 211017 09:06SP	Sao Paulo, Brazil	4	4	4	0	4	4	2	4	2	0	5	0	14	6	7	17	48	0	79	199	9	4	17	6	11	20	50	4	81	199
Minalba	FAB: 160817 15:05SP	Aparecida de Goiania, Braz	4	0	8	4	0	6	10	2	15	6	0	0	3	43	0	10	11	5	0	0	4	0	11	47	0	16	20	7	15	6
Minalba	FAB: 091217 16:53SP	Rio de Janeiro, Brazil	2	0	4	0	6	0	0	0	0	39	37	0	2	0	54	0	32	25	479	824	39	0	6	0	60	0	32	25	479	863
Nestle Pure Li	100517 278WF246	Amazon.com	24	38	22	22	28	28	32	28	38	40	101	1074	30	106	110	1249	622	1511	7322	10351	124	1111	51	127	137	1276	653	1538	7359	10390
Nestle Pure Li P:	4/11/17 01:34 AZ	Beirut, Lebanon	12	18	18	6	12	12	12	8	6	8	64	136	27	0	27	21	40	57	14	0	75	153	44	6	38	32	51	64	19	8
Nestle Pure Li	730805210A 23:28	Bangkok, Thailand	2	28	8	4	28	8	66	12	18	8	140	147	83	23	398	4	3461	87	105	60	141	174	90	26	425	11	3526	98	122	67
San Pellegrino	BBE 11.2018 10	Amazon.com	1	4	4	0	2	2	0	2	2	1	74	29	38	0	27	15	30	6	34	35	74	33	41	0	28	17	30	7	35	36
Wahaha	20171102 1214JN	Jinan, China	9	11	4	26	18	4	1	11	4	3	225	198	65	705	54	26	61	62	34	37	234	209	69	731	71	30	62	73	39	39
Wahaha	20171021 3214GH	Beijing, China	0	0	9	4	4	4	3	21	4	--	178	101	39	9	106	55	42	0	21	--	178	101	48	13	110	60	45	21	25	--
Wahaha	20171103 2106WF	Qingdao, China	4	8	4	1	1	8	4	3	11	1	86	108	44	0	0	158	39	0	87	104	91	116	48	1	1	165	44	3	98	105

В **таблице 2** приведены среднее (по размеру и общему количеству), а также минимальная и максимальная микропластическая плотность (в MPP / л) для каждой партии, усредненной по всем протестированным бутылкам. При усреднении по отдельным бутылкам все 27 протестированных партий показали некоторое количество микропластического загрязнения (**Таблица 2**). Внутри брендов существует значительная разница между разными партиями, что может быть обусловлено рядом факторов, таких как источник воды, различные возможности розлива в бутылки, а также условиями и / или продолжительностью времени, отведенного на доставку от пунктов розлива до места приобретения. Семнадцать отдельных бутылок, которые не показали микропластического загрязнения сверх возможного лабораторного фона (**Таблица 1**), полученные из 7 партий (~ 25%) из 27 протестированных. Таким образом, микропластическое загрязнение было обнаружено во всех бутылках в 75% проанализированных партий.

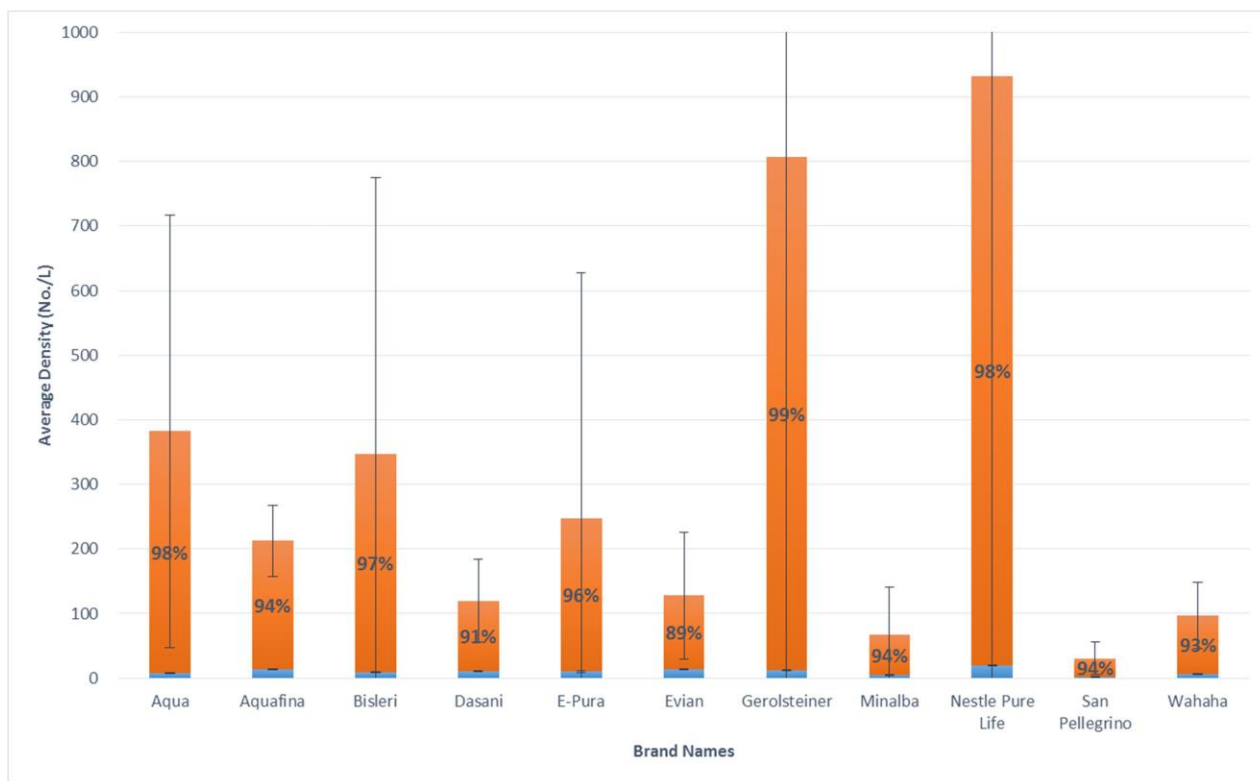
**Таблица 2.** Плотность микропластика (MPP / L), по фракциям по размеру и общему количеству, усредненная по всем бутылкам в одной партии. Минимальные и максимальные плотности внутри партии также предоставляются. NR= Nile Red

Марка	Партия	Место приобретения	Средняя величина плотности микропластика				
			NR+FTIR Подтвержденные частицы (>100 um)	NR частицы (6.5-100 um)	Итого Средний показатель	Минимум	Максимум
Aqua	IB 101119	Jakarta, Indonesia	6.68	30.4	37.1	3	133
Aqua	BB 311019 08:11 PSRL6	Bali, Indonesia	10.5	695	705	1	4713
Aqua	BB 311019 09:50 STB1	Medan, Indonesia	6.93	397	404	0	3722
Aquafina	Oct0719	Amazon.com	14.8	237	252	42	1295
Aquafina	BN7141A04117	Chennai, India	11.6	162	174	2	404
Bisleri	HE.B.No.229 (BM/AS)	Chennai, India	18.0	808	826	39	5230
Bisleri	MU.B.No.298 (MS/AD)	Mumbai, India	8.85	204	213	2	1810
Bisleri	SO.B.No.087 (AS/LB)	New Delhi, India	0.57	3.15	3.72	0	32
Dasani	Oct 0118NHBRB	Amazon.com	14.6	150	165	85	303
Dasani	P18NOV17CG3	Nairobi, Kenya	6.28	68.3	74.6	2	335
E-Pura	17.11.18	Mexico City, Mexico	22.3	664	686	11	2267
E-Pura	14.10.18	Tijuana, Mexico	7.76	12.2	20.0	3	92
E-Pura	09.08.18	Reynosa, Mexico	0.21	37.1	37.3	0	149
Evian	PRD 03 21 2017 14:02	Amazon.com	26.0	171	197	126	256
Evian	PRD 05 24 17 11:29	Fredonia, NY, USA	1.51	56.7	58.2	0	256
Gerolsteiner	07.142018 2	Fredonia, NY, USA	14.8	1396	1410	11	5106
Gerolsteiner	NV No. AC-51-07269	Amazon.com	8.96	195	204	9	516
Minalba	FAB: 211017 09:06SP	Sao Paulo, Brazil	2.56	37.5	40.1	4	199
Minalba	FAB: 160817 15:05SP	Aparecida de Goiania, Braz	5.30	7.19	12.5	0	47
Minalba	FAB: 091217 16:53SP	Rio de Janeiro, Brazil	5.01	145	150	0	863
Nestle Pure Lif	100517 278WF246	Amazon.com	29.8	2247	2277	51	10390
Nestle Pure Lif	P: 4/11/17 01:34 AZ	Beirut, Lebanon	11.0	38.2	49.3	6	153
Nestle Pure Lif	730805210A 23:28	Bangkok, Thailand	18.0	450	468	11	3526
San Pellegrino	BBE 11.2018 10	Amazon.com	1.68	28.6	30.3	0	74
Wahaha	20171102 1214JN	Jinan, China	9.10	147	156	30	731
Wahaha	20171021 3214GH	Beijing, China	5.53	61.2	66.7	13	178
Wahaha	20171103 2106WF	Qingdao, China	4.40	62.7	67.1	1	165

При усреднении по всем партиям и всем маркам в тестируемой бутилированной воде было обнаружено 325 MPP / л (в среднем 10,4 MPP / л, встречающихся в более широком диапазоне размеров (> 100 мкм) и в среднем 315 MPP / л в пределах меньшего размерного ряда (6,5-100 мкм)). В то время как все партии воды в бутылках показали некоторые признаки микропластического загрязнения (**Таблица 2**), между брендами были значительные различия (**Рисунок 1**). В процессе выявления средней величины согласно брендам, Nestle Pure Life и Gerolsteiner показали самые высокие показатели плотности при 930 и 807 MPP / л соответственно, в то время как Сан-Пеллегрино и Минальба показали самое низкое микропластическое загрязнение в 30,0 и 63,1 MPP / л соответственно (**рисунок 1**). Планка погрешностей на рисунке 1 представляют одно стандартное отклонение и



довольно велики, учитывая большую изменчивость среди отдельных бутылок для каждой партии (Таблица 1), а так же различия между партиями одной и той же марки (Таблица 2).



**Рисунок 1.** Плотность микропластика, усредненная по отдельным бутылкам и партиям по брендам. Синие столбики - плотности для частиц FTIR (> 100 мкм); Оранжевые столбики предназначены для частиц «Galaxy Count» (6,5–100 мкм). Столбики ошибок - одно стандартное отклонение. Процентная доля указана для общего количества частиц «Galaxy Count» (6,5–100 мкм); доля крупных частиц может быть получена расчетным путем.

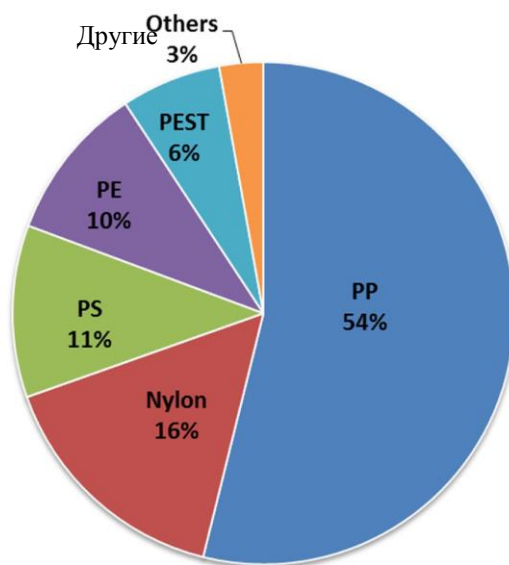
Из всех протестированных партий только одна была упакована в стекло, а не в пластик: Gerolsteiner (NV № AC-51-07269). В то время как эти образцы выявили микропластическое загрязнение, они сделали это на более низком уровне по сравнению с другими партиями (Таблица 1, 2). Кроме того, мы протестировали воду той же марки, но упакованную в пластик вместо стекла (Gerolsteiner, 14.142018 2). Хотя обе эти упакованные воды имеют один и тот же источник воды, микропластическое загрязнение в воде, разлитой в стекло, было значительно меньше, чем в упаковке из пластика (204 против 1410 ПДК / л соответственно). Это указывает на то, что часть микропластического загрязнения, вероятно, происходит от источника воды, но в большей степени может быть связан с самой упаковкой.

#### NR + FTIR подтвержденные частицы (> 100 мкм)

В общей сложности почти 2000 микропластических частиц > 100 мкм были извлечены из всех фильтров, и почти 1000 (~ 50%) были дополнительно проанализированы с помощью FTIR. Полученные FTIR-спектры сравнивали с базой известных спектров, чтобы подтвердить и идентифицировать полимерное содержание частиц. Все проанализированные частицы были либо лучше всего сопоставлены с полимером, пластиковой добавкой или известным связующим пластиком

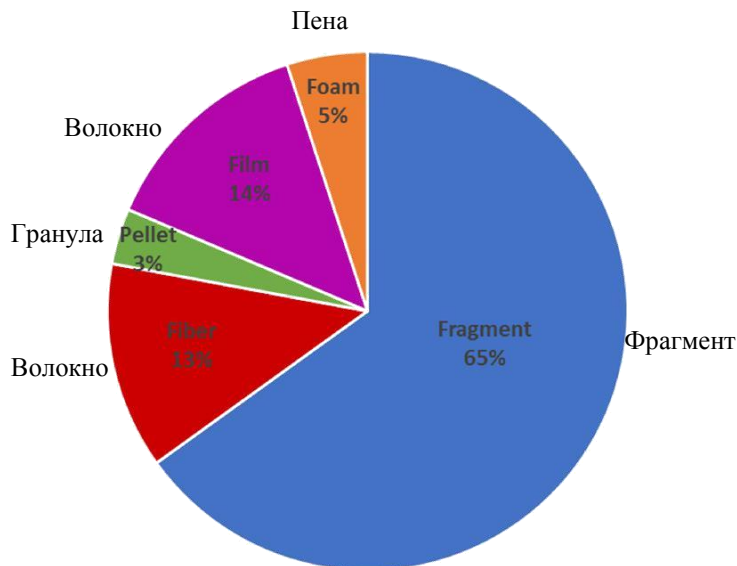
обеспечивающие дополнительные подтверждающие доказательства того, что Nile Red селективно впитывает/адсорбирует микропластичные частицы в бутылочной воде. С этим спектроскопическим подтверждением можно сделать вывод, что в среднем каждая бутылка воды содержит не менее 10,4 мпп / л (**Таблица 2**). Хотя этот анализ подтвердил полимерную природу этих частиц, нам потребовалось соответствие 70% или более, чтобы определить идентичность полимера. В общей сложности более 400 частиц (20% всех извлеченных пластиковых частиц > 100 мкм и 40% тех, что были проанализированы с помощью FTIR) встретили этот порог для подтверждения идентичности.

Было обнаружено, что полипропилен является наиболее распространенным полимерным материалом (54%), а нейлон занимает второе место по распространенности (16%) (**рис. 2**). Полипропилен является полимером, часто используемым для изготовления пластиковых крышек бутылок, наряду с полиэтиленом, что соответствует 10% анализируемых частиц. Интересно, что 4% выбранных частиц имели признаки промышленных смазывающих веществ, покрывающих полимер (не показано).



**Рисунок 2.** Полимерное содержание микропластичных частиц > 100 мкм. PP = полипропилен; PS = полистирол; PE = полиэтилен; PEST = полиэстер + полиэтилентерефталат; Другие включают азлон, полиакрилаты и сополимеры.

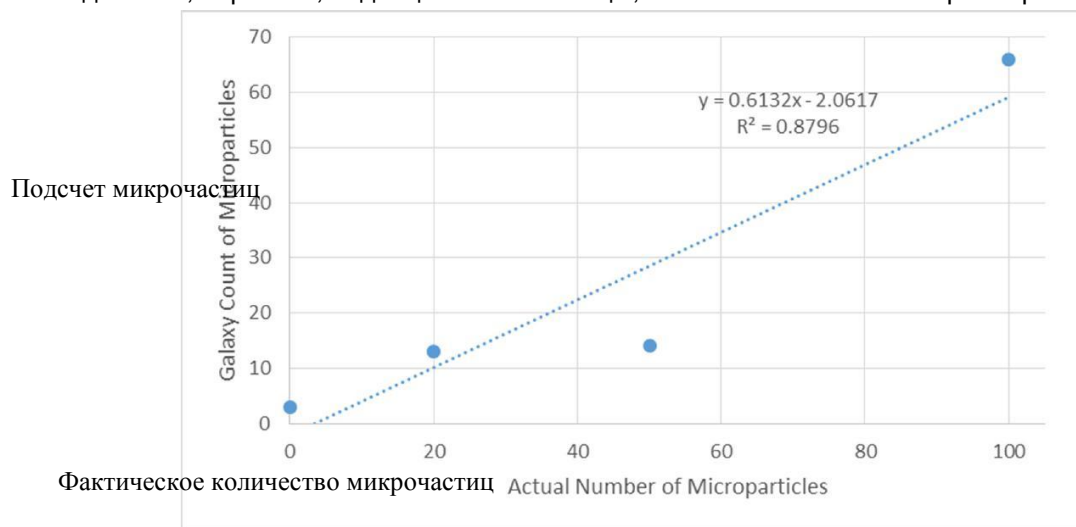
Как это принято в исследованиях загрязнения пластика, все микропластики размером > 100 мкм были визуальным образом охарактеризованы в соответствии с их морфологией: фрагмент, волокно, гранула, пленка или пена. Было обнаружено, что фрагменты являются наиболее распространенным типом частиц (66%), за которыми следуют волокна (13%) и пленки (12%) (**рис. 3**). 13% частиц, описанных как волокна (**рис. 3**), хорошо сравниваются с 17% частиц, которые были подтверждены FTIR, как состоящие из волокнистых полимеров, прежде всего нейлона (**рис. 2**).



**Рисунок 3.** Морфология микропластиков > 100 мкм, обнаруженных в бутелированной воде.

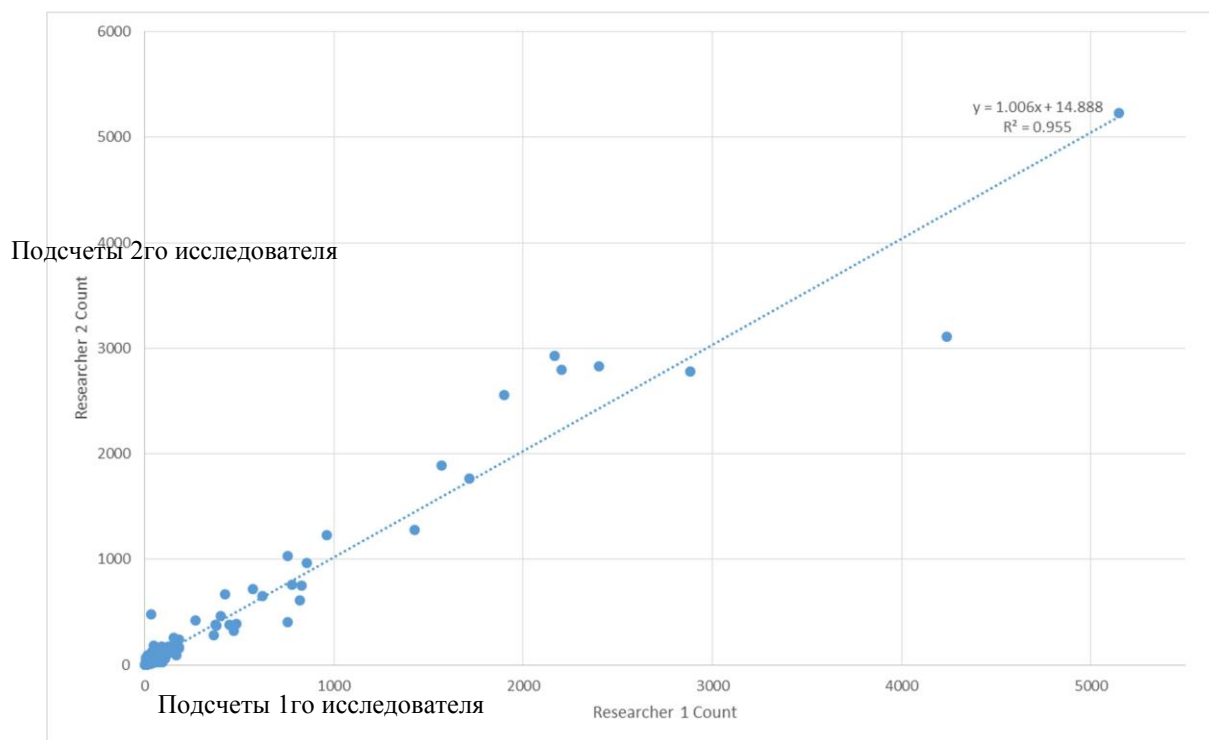
#### NR-меченые частицы (6,5 –100 мкм)

Чтобы проверить эффективность программного обеспечения «Galaxy Count» для подсчета микропластиков размером менее ~ 100 мкм, программное обеспечение было протестировано с использованием растворов с известными количествами (0,20, 50 или 100) микросфер (диаметры 75-90 мкм), обработанных способом, идентичным всем образцам и лабораторным бланкам. «Galaxy Count» флуоресцирующих частиц на фотографиях квадранта фильтра очень хорошо соответствовал фактическому количеству частиц, включенных в растворы (**рис. 4**). Отличное совпадение с этими тестовыми решениями поддерживает использование этого инструмента для количественного определения количества более мелких частиц в анализируемой бутелированной воде, в то время как у-пересечение подгонки наименьших квадратов еще раз подтверждает, что исследование, вероятно, недооценивает частицы, особенно наименьшего размерного ряда.



**Рисунок 4.** Сравнение подсчетов с использованием программного обеспечения «Galaxy Count» относительно известного количества микропластичных частиц в 4 тестовых растворах.

Все подсчеты с использованием программного обеспечения «Galaxy Count» проводились независимо двумя разными исследователями из-за возможных изменений в настройках программного обеспечения. Как показано на **рисунке 5**, совпадение по подсчетам между двумя исследователями, подтверждает эффективность и достоверности использования программного обеспечения для подсчета мелких частиц в бутылированной воде.



**Рисунок 5.** Сравнение микропластических показателей с помощью программного обеспечения «Galaxy Count» для частиц <100 мкм во всех 259 бутылках, протестированных двумя исследователями, работающими независимо друг от друга.

Учитывая ограничения лаборатории, частицы <100 мкм (так называемые «частицы с меткой NR») не могли быть подтверждены как полимерные с помощью спектроскопического анализа (FTIR и / или комбинационного рассеяния света). Однако при тестировании различных пятен и красителей, которые могут быть использованы для обнаружения и анализа микропластов в пробах окружающей среды, с большей вероятностью ошибочной идентификации и ложных срабатываний (то есть отложений и проб поверхностных вод), как Maes et al. (2107) и Erni-Cassola et al. (2017) пришли к выводу, что Nile Red (NR) был очень избирательным, особенно в пределах временных шкал инкубационного периода, и его можно было использовать для быстрого обнаружения микропластиков без необходимости дополнительного спектрального анализа. Чтобы быть уверенным, именно поэтому данная краска была использована для этого исследования. Кроме того, FTIR-анализ был проведен на флуоресцентных частицах > 100 мкм, и каждая проанализированная частица была подтверждена как полимерная. Более того, NR хорошо зарекомендовал себя для селективной адсорбции на гидрофобные («боящиеся воды») материалы и, как таковой, не будет адсорбироваться на единственном содержании, разумно ожидаемом находящемся в бутылированной воде, воде и / или ее минеральных компонентах. Кроме того, Schymanski et al. (2018) сообщили, что Раман подтвердил плотность частиц в пределах аналогичного диапазона размеров и даже меньше (5–500 мкм) в

бутылках немецкой бутилированной минеральной воды. Таким образом, как минимум, хотя частицы <100 мкм не были спектроскопически подтверждены как микропластики, ожидается, что частицы рационально должны быть пластичными или иметь какое-либо другое антропогенное происхождение.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Частично стимулом для этого исследования послужило продолжение исследования водопроводной воды, опубликованного (частично) в сентябре 2017 года (Kosuth et al. 2018). Методы, использованные в этом исследовании, незначительно отличались по сравнению с этим более ранним исследованием, особенно в использовании другой окраски. Rose Bengal использовалась в более раннем исследовании, в то время как Nile Red использовался здесь. Два красителя имеют противоположное сходство. В то время как пластики адсорбируют Nile Red (что позволяет легко их обнаружить по флуоресценции), они не адсорбируют Rose Bengal. Сходство пластика к адсорбции Nile Red позволяет обнаруживать более мелкие частицы по сравнению с методом Rose Bengal, как было отмечено в недавнем исследовании Erni-Cassola et al. (2018). Таким образом, только наши данные о частицах > 100 мкм сопоставимы с данными в предыдущем исследовании водопроводной воды.

Мы обнаружили примерно в два раза больше пластиковых частиц (> 100 мкм) в бутилированной воде по сравнению с водопроводной водой в среднем (10,4 против 5,45 частиц / л). Хотя волокна, составили 97% микропластика в ходе исследования водопроводной воде, изучают, они составляют только 13% частиц в бутилированной воде. Вместо этого фрагменты были самой распространенной морфологией частиц (65%) в бутилированной воде. Эти результаты показывают, что основной источник микропластических частиц отличается. Учитывая морфологию фрагментов в сочетании с тем фактом, что было обнаружено, что 4% частиц имеют признаки промышленных смазочных материалов, данные, по-видимому, позволяют предположить, что, по крайней мере, часть пластикового загрязнения может быть результатом промышленного процесса розлива самой воды. Поскольку полипропилен был наиболее распространенным найденным полимером, фрагменты могли также отколоть крышку, даже попав в воду через простое открытие бутылки.

Совсем недавно Schymanski et al. (2018) опубликовали свое исследование микропластикового загрязнения упакованной минеральной воды. Что касается нашего исследования, они протестировали более широкий спектр упаковочных материалов - от многоразовых и одноразовых пластиковых бутылок до картонных коробок и стекла, в то время как мы почти полностью сосредоточились на одноразовых пластиковых бутылках (в качестве альтернативы была упакована одна партия в стекле). В целом они протестировали меньшее количество бутылок по сравнению с нашим исследованием. Чтобы сравнить эти два исследования (Schymanski et al. 2018 с нашими), мы сосредоточимся только на их данных для одноразовых пластиковых бутылок для напитков. В этих пределах они протестировали в общей сложности 11 бутылок по сравнению с нашими 259. Хотя они не указывают, сколько разных брендов, для одной марки они протестировали 2 разных лота (приобретенных с интервалом в 6 недель), но протестировали только 1 лот для остальных.

Наша средняя плотность микропластика по всем анализируемым маркам, партиям и бутылкам (325 MPP / л) значительно выше, чем сообщенная Schymanski et al. (2018) (14 MPP / л). Эта разница может быть из-за ряда факторов. Во-первых, поскольку они сообщают, что они только подсчитали частицы

для которых они могли полностью подтвердить полимерную природу, используя спектроскопию комбинационного рассеяния света. Мы использовали адсорбцию Nile Red в качестве нашего передового подтверждения микропластиковой идентичности, используя FTIR для частиц, просто чтобы предоставить больше информации о конкретном полимере. Как отмечают авторы, в то время как может анализировать частицы меньшего размера, чем FTIR, интенсивность лазера может привести к разложению частицы до получения адекватных спектров. Schymanski et al. (2018) не включили эти частицы в свои подсчеты, что привело к снижению их расчетных плотностей. Кроме того, как показывают наши данные, между брендами и лотами может быть существенная разница. Наш значительно больший выборочный набор обеспечивает больший учет этой изменчивости.

Другое различие между нашими исследованиями - это распределение типов полимеров. Schymanski et al. (2018) обнаружили, что PEST (комбинация полиэфира и полиэтилентерефталата) является доминирующим полимерным материалом для загрязняющих их частиц, в то время как эта та же классификация составляла только 6% наших анализируемых частиц. Мы обнаружили, что полипропилен является доминирующим пластиком (54%), на долю которого приходится только 1% их частиц. Здесь, однако, наши два исследования не полностью сопоставимы. Schymanski et al. (2018) проанализировали и определили идентичность полимеров для всех подсчитанных частиц, в то время как мы сделали это только для частиц > 100 мкм. Вполне возможно, что более мелкие частицы, которые мы не смогли проанализировать, состояли в основном из полимеров в категории PEST, что могло сильно изменить наш процентную долю. Тем не менее, мы оба делаем выводы из наших данных о том, что упаковка самой воды является вероятным источником загрязнения, хотя для нас это, кажется, колпачки, в то время как для Schymanski et al. (2018) - это бутылка.

Несмотря на различия между нашими исследованиями, некоторые сходства существуют. Мы оба обнаружили, что на полиэтилен приходится около 10% полимерных загрязнений. Кроме того, мы оба обнаружили, что более мелкие частицы обеспечивают больший вклад в общее количество частиц по сравнению с более крупными частицами (> 100 мкм). Во всех образцах 95% наших частиц составляли менее 100 мкм, в то время как Schymanski et al. (2018) обнаружили, что они составляют 98% от их числа. Более того, эти два исследования, взятые вместе, подтверждают основную мысль о том, что в бутилированной воде присутствуют микропластики, и, по крайней мере, некоторые из этих загрязнений могут быть вызваны промышленным процессом розлива воды, а также самим упаковочным материалом.

## **ВЫВОДЫ**

Двадцать семь различных партий воды в бутылках от 11 различных брендов, приобретенных в 19 местах в 9 разных странах, были проанализированы на микропластиковое загрязнение с использованием красителя Nile Red, который адсорбируется на полимерном материале и флуоресцирует при определенных длинах волн падающего света. Использование флуоресцентного красителя позволило обнаружить более мелкие частицы по сравнению с аналогичным исследованием водопроводной воды с использованием окраски Rose Bengal, хотя аналитические методы, использованные для их подсчета, ограничивали нижний предел размера до 6,5 микрон.

Из 259 проанализированных бутылок 93% показали признаки микропластика. Существовали значительные различия даже среди бутылок одной и той же марки и партии, что согласуется с отбором проб из окружающей среды и, вероятно, является результатом сложностей микропластиковых источников, процесса производства и динамики частиц и жидкости, в том числе. Поскольку объем бутылок варьировался по брендам, абсолютное количество частиц было разделено на объем бутылок, чтобы получить плотности микропластичных частиц, которые были сопоставимы для всех марок, партий и бутылок. Эти плотности были уменьшены лабораторными пробами, чтобы учесть любое возможное загрязнение. Учитывая наше использование лабораторных бланков, невозможность сфотографировать полный фильтр, нижний предел одного пикселя был эквивалентен 6,5 микрометрам, и контрольные прогоны программного обеспечения, используемого для цифрового подсчета частиц размером менее 100 микрометров, приведенные здесь цифры являются очень консервативными и, вероятно, есть недооценка, особенно в отношении более мелких микропластиков (<100 микрометров), которые оказались более заметными (в среднем 95%) по сравнению с частицами размером более 100 микрометров (в среднем 5%).

Инфракрасный анализ частиц размером более 100 микрометров подтвердил микропластическую идентичность и обнаружил, что полипропилен является наиболее распространенным (54%) полимерным материалом (по крайней мере, в отношении этих более крупных микропластиков), что согласуется с обычным пластиком, используемым для изготовления колпачков для бутылок. Более мелкие частицы (6,5–100 микрометров) не могли быть проанализированы для идентификации полимера с учетом аналитических пределов лаборатории. Хотя эти более мелкие частицы не могут быть спектроскопически подтверждены как пластиковые, Nile Red абсорбируется гидрофобными («боящиеся воды») материалами, которые, как разумно ожидать, не будут естественным образом обнаруживаться в бутылкированной воде. Наш FTIR-анализ более крупных (> 100 мкм частиц) флуоресцирующих частиц, все из которых были подтверждены как полимерные, обеспечивает дополнительную поддержку селективного связывания NR с микропластичными частицами в образцах. Более того, Schymanski et al. (2018) действительно спектроскопически подтвердили (с помощью комбинационного рассеяния) присутствие частиц в этом меньшем диапазоне размеров в немецкой бутылкированной воде, поскольку их полимерная природа обеспечивает дополнительную поддержку их присутствия. Учитывая это и следуя выводам предыдущих исследований (например, Maes et al. (2017) и Erni-Cassola et al. (2017)), адсорбция только Nile Red использовалась для придания микропластической идентичности этим более мелким частицам. Поскольку конкретное содержание полимера не может быть определено, они могут очень хорошо показать другую композиционную структуру по сравнению с более крупными анализируемыми частицами. Это может объяснить разницу в нашем анализе полимерного состава по сравнению с очень недавним и аналогичным анализом минеральных вод в бутылках, выполненных Schymanski et al. (2018), где PEST (полиэстер + полиэтилентерефталат) является наиболее распространенным полимерным материалом, совместимым с обычным пластиком, используемым для изготовления самой бутылки. В любом случае оба исследования показывают, что, по крайней мере, часть микропластического загрязнения возникает в результате упаковочного материала и / или самого процесса розлива в бутылки.

## ССЫЛКИ

- Бреннеке, Д., С. Е. Феррейра, М. М. Т. Коста, Д. Аппель, П. А. Б. де Гама, М. Ленц (2015). Проглатываемые микропластики перемещаются в органы тропического краба-скрипача *Uca gaha*. *Бюллетень о загрязнении морской среды*, 96, 491-495.
- Карпентер, Э. Дж. и К. Л. Смит (1972). Пластмассы на поверхности Саргассова моря. *Наука*, 175, 1240-1241.
- Эрни-Кассола, Г., М. И. Гибсон, Р. С. Томпсон и Дж. Кристи-Олеца (2017). Утрачен, но обнаружен с помощью Nile Red: новый метод обнаружения небольших количеств микропластов (20 мкм-1 мм) в пробах окружающей среды, *Environmental Science & Technology*, 51, 13641-13648.
- Идальго-Руз, В., Л. Гутоу, Р. С. Томпсон и М. Тиль (2012). Микропластика в морской среде: обзор методов, используемых для идентификации и количественного определения. *Environmental Science & Technology*, 46, 3060-3075.
- Хортон, А. А., А. Уолтон, Д. Дж. Сперджон, Э. Лахив и К. Свендсен (2017). Микропластика в пресноводных и наземных средах: оценка текущего понимания для выявления пробелов в знаниях и приоритетов будущих исследований. *Science of the Total Environment*, 586, 127-141.
- Кошут М., С. А. Мейсон и Е. В. Ваттенберг (2018). Антропогенное загрязнение водопроводной воды, пива и морской соли. *PLOS One*, в обзоре.
- Либецайт Дж. и Е. Либецайт (2014) Синтетические частицы как примеси в немецком пиве. *Food Additives & Contaminants*, 31, 1574-1578.
- Люшер А.Л., П.С. Х. Холлман, и Дж.Дж. Мендоза-Хилл (2017). Микропластики в рыболовстве и аквакультуре: знания об их возникновении и последствиях для водных организмов и безопасности пищевых продуктов. Технический документ ФАО по рыболовству и аквакультуре. Г. № 615. Рим, Италия.
- Маес, Т. Р. Джессоп, Н. Велнер, К. Гаупт, А. Г. Майерс (2017). Метод быстрого скрининга для обнаружения и количественной оценки микропластиков, основанный на флуоресцентной маркировке Nile Red. *Scientific Reports*, 7, 44501-44511.
- PlasticsEurope (2015). Пластмассы. Факты 2015: анализ европейских данных о производстве, спросе и отходах пластмасс.
- Реннер Г., Т. С. Шмидт и Дж. Шрам (2018). Аналитические методологии для мониторинга микро (нано) пластиков: какие подходят для цели? *Environmental Science & Health*, 1, 55-61.
- Шумански, Д., С. Гольдбек, Х.-У. Хампф, и П. Фурст (2018). Анализ микропластика с помощью микрорамановской спектроскопии: выброс пластиковых частиц из разных упаковок в минеральную воду. *Water Research*, 129, 154-162.
- Шарма, С. и С. Чаттерджей (2017). Микропластическое загрязнение, угроза морской экосистеме и здоровью человека: краткий обзор. *Environmental Science Pollution Research*, 24, 21530-21547.
- ЮНЕП (2016). Морской пластиковый мусор и микропластики: глобальные уроки и исследования для стимулирования действий и руководства изменениями политики. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, Найроби.



- Ван Кавенберге, Л. и С. Р. Янссен (2014). Микропластики в двустворчатых моллюсках, культивируемых для потребления человеком. *Environmental Pollution*, 193, 65-70.
- Ян, Д., Х. Ши, Л. Ли, К. Джабин и П. Коландхасами (2015). Микропластическое загрязнение в столовой соли из Китая. *Environmental Science & Technology*, 49, 13622-13627.
- Йонкос, Л. Т., Е. А. Фридель, А. С. Перес-Рейес, С. Гнесаль и С. А. Артур (2014). Микропластика в четырех устьях рек Чесапикского залива, США. *Environmental Science & Technology*, 48, 14195-14202.