

Краевое государственное бюджетное учреждение дополнительного образования  
«Алтайский краевой детский экологический центр»

Экологический мониторинг

**Влияние микрочастиц пластика различных видов на процессы  
прорастания семян *Raphanus sativus L.***

Автор: Набока Никита,  
8 класс, обучающийся  
КГБУ ДО АКДЭЦ

Руководитель: Ашенбреннер  
Елена Сергеевна, педагог  
дополнительного образования  
КГБУ ДО АКДЭЦ

г. Барнаул, 2026 г.

## Оглавление

Введение.....	3
1. Теоретическая часть.....	5
2. Материал и методы исследований .....	8
3. Практическая часть .....	9
3.1 Результаты исследований.....	9
Выводы.....	15
Рекомендации и практические предложения .....	15
Список литературы .....	16
Приложение .....	18

## Введение

**Актуальность.** Микропластик, как загрязнитель окружающей среды, в последние годы стал объектом пристального внимания научного сообщества. Его повсеместное распространение в водных, почвенных и атмосферных экосистемах вызывает обеспокоенность в связи с потенциальным влиянием на живые организмы. Несмотря на обширные исследования токсичности микропластика для гидробионтов, данные о его воздействии на растения, особенно на ранних этапах роста и развития, остаются ограниченными и зачастую противоречивыми.

Редис посевной (*Raphanus sativus L.*) – быстрорастущее однолетнее растение, широко используемое в экотоксикологических исследованиях в качестве высоко чувствительного биоиндикатора. Благодаря короткому циклу прорастания, высокой воспроизводимости результатов и выраженной реакции на внешние стрессоры, редис является удобным модельным объектом для оценки фитотоксического действия антропогенных загрязнителей, включая микропластик.

Одним из ключевых факторов, определяющих степень воздействия микропластика, является его химический состав. Разные пластики (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS и др.) обладают различной физико-химической природой, содержат специфические добавки (пластификаторы, стабилизаторы, красители) и могут по-разному влиять на физиологические процессы у растений. При этом комплексные сравнительные исследования, которые помогают оценить влияние различных типов микропластика на семена и проростки, в доступных источниках единичны.

**Цель** – выявление закономерностей влияния микрочастиц пластика различных видов на процессы прорастания и начальные этапы роста и развития семян *Raphanus sativus L.* на основе комплексного анализа физиологических, морфометрических и биомассовых показателей.

### **Задачи:**

- смоделировать процесс образования микрочастиц пластика в лабораторных условиях с использованием ультразвуковой обработки и провести количественный анализ образовавшихся микрочастиц;
- оценить влияние микрочастиц различных видов пластика на энергию прорастания и всхожесть семян;
- проанализировать изменения фитомассы, длины корешка, ростка и коэффициента симметрии развития проростков;
- установить взаимосвязь между химическим составом пластика и характером его фитотоксического действия.

**Объект исследования** – процессы прорастания и начального роста семян *Raphanus sativus L.*

**Предмет** – влияние микропластика различных видов на процессы прорастания и развития семян *Raphanus sativus L.*

**Материал и методы.** Исследования проведены в 2025 году в лаборатории «Школа световой микроскопии» КГБУ ДО АКДЭЦ. В качестве источника микропластика использовались образцы пластиковых отходов, измельченные и подвергнутые ультразвуковой обработке для моделирования естественного механического разрушения. Учет показателей проращивания семян проводился согласно ГОСТ 12038-84. Микроскопический анализ частиц проводился с использованием светового микроскопа. Статистическая обработка данных выполнена в программе Past 5.

**Новизна.** Впервые проведено сравнительное исследование влияния семи основных типов микропластика (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, OTHER) на семена *Raphanus sativus L.* с комплексной оценкой не только классических показателей (всхожесть, энергия прорастания), но и морфометрических параметров проростков, включая коэффициент симметрии, что позволило выявить скрытые эффекты стрессового воздействия.

**Практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные расширяют понимание экологических рисков, связанных с микропластиковым загрязнением почвы и воды, и могут быть использованы при разработке экологических нормативов, а также в образовательной деятельности для демонстрации влияния пластиковых отходов на растительные организмы. Результаты работы актуальны для специалистов в области экологии, агрономии и экотоксикологии. Материал исследований может быть использован с научно-популярной целью для формирования экологической культуры у школьников и студентов.

## 1. Теоретическая часть

Пластик, благодаря своей долговечности, универсальности и низкой стоимости, стал неотъемлемой частью повседневной жизни человека. Однако его устойчивость к естественному разложению приводит к накоплению в экосистемах огромного количества полимерных материалов, которые со временем разрушаются на всё более мелкие фрагменты. Одним из наиболее тревожных явлений последних десятилетий стало распространение микропластика – твёрдых пластиковых частиц размером менее 5 мм, которые способны проникать во все компоненты биосферы: водные объекты, почву, воздух и живые организмы [12].

Микропластик классифицируют на первичный и вторичный. Первичный микропластик изначально производится в виде мелких гранул или волокон для использования в косметике, медицинских препаратах или как сырьё для переработки. Вторичный микропластик образуется в результате физического, химического и биологического разрушения крупных пластиковых изделий (упаковки, синтетической одежды, автомобильных шин, рыболовных сетей и других предметов) [12]. Основными источниками попадания микропластика в почвенную среду являются использование сточных вод и осадков канализации в качестве удобрений, применение компоста, содержащего пластиковые примеси, а также атмосферные выпадения и поверхностный сток с городских территорий [10].

Исследования показывают, что концентрация микропластика в сельскохозяйственных почвах может достигать нескольких тысяч частиц на килограмм грунта, что делает эту проблему особенно актуальной для продовольственной безопасности [7]. Хотя большая часть внимания исследователей изначально была сосредоточена на водных экосистемах, где микропластик легко перемещается и накапливается в организмах гидробионтов, в последние годы растёт интерес к его влиянию на наземные экосистемы, в частности на почву и растительность. Почва представляет собой сложную систему, в которой микропластик может изменять физические свойства (структуру, плотность, водоудерживающую способность), влиять на деятельность микроорганизмов и беспозвоночных, а также напрямую взаимодействовать с корнями растений [8].

Некоторые исследования указывают на то, что микропластик может изменять состав микробного сообщества в ризосфере, что, в свою очередь, может повлиять на доступность питательных веществ и устойчивость растений к стрессам [2]. Кроме того, пластиковые частицы могут адсорбировать на своей поверхности токсичные вещества, такие как тяжёлые металлы и органические загрязнители, выступая в роли переносчика, доставляющего эти соединения в корневую зону растений [11].

Особое значение имеет влияние микропластика на ранние этапы онтогенеза растений – на процессы прорастания семян и формирование первых органов. Как отмечают авторы, именно фаза прорастания закладывает основу

для дальнейшего роста и развития растений, поэтому её изучение крайне важно для оценки экологического риска [5].

Результаты исследований по влиянию микропластика на прорастание семян до сих пор остаются противоречивыми. Некоторые учёные регистрируют значительное угнетение всхожести и энергии прорастания, другие, наоборот, наблюдают стимулирующий эффект или отсутствие достоверных изменений. Такая неоднозначность связана с большим количеством факторов, влияющих на результат: типом пластика, размером и формой частиц, их концентрацией в среде, длительностью экспозиции, а также видовой принадлежностью тест-объекта [13]. Например, экспериментально показано, что при концентрации микропластика 100 мг/л происходит значительное ингибирование роста растений, вероятно, за счёт блокировки клеточных пор и нарушения транспорта питательных веществ [8]. Другие исследования подтверждают, что микропластик может оказывать физическое давление на корни, ограничивать их развитие и снижать общую всасывающую поверхность [11].

Одним из ключевых факторов, определяющих степень воздействия микропластика, является его химический состав. Разные виды пластика обладают различной физико-химической природой, разной степенью гидрофобности, пористостью и структурой поверхности. Они содержат специфические добавки: пластификаторы, стабилизаторы, антипирены, красители, которые могут выщелачиваться в окружающую среду и оказывать токсическое действие. Например, PVC содержит хлор и часто сопровождается фталатами – веществами, известными своими эндокринными и токсическими свойствами. LDPE и HDPE, хотя и считаются относительно инертными, могут выделять остатки катализаторов полимеризации и другие летучие органические соединения [9]. PET, помимо мономеров, может содержать следы сурьмы, используемой в качестве катализатора, которая проявляет токсичность даже в малых концентрациях [4]. Таким образом, даже если сами полимеры химически устойчивы, их добавки и продукты деградации могут представлять серьёзную опасность для живых организмов.

Для изучения влияния микропластика на растения учёные используют различные модельные объекты. Одним из наиболее популярных является райграс [5, 10]. Этот злак хорошо растёт в лабораторных условиях и чувствителен к изменениям в почве. Однако для фитотоксикологических исследованиях всё чаще применяются представители семейства крестоцветных, включая редис посевной. Этот вид выбран не случайно. Редис широко используется в экотоксикологических исследованиях как высокочувствительный биоиндикатор. Его преимущества очевидны: семена быстро и дружно прорастают, жизненный цикл короткий, реакция на стрессоры выраженная и легко измеряемая по таким показателям, как всхожесть, энергия прорастания, длина корешка и ростка, масса проростков и их морфологические особенности [9]. Благодаря этим качествам редис позволяет проводить надёжные и воспроизводимые эксперименты по оценке фитотоксичности различных загрязнителей, в том числе микропластика.

Несмотря на то, что данные по влиянию микропластика на растения продолжают накапливаться, многие механизмы этого воздействия остаются недостаточно изученными. Известно, что микропластик может действовать как физический стрессор, нарушая контакт семени с почвой, изменяя газовый режим и влажность среды, что затрудняет водопоглощение и дыхание зародыша. Также он может выступать как химический стрессор, выделяя токсичные компоненты, которые напрямую повреждают клетки, нарушают синтез белков и нуклеиновых кислот, вызывают оксидативный стресс и апоптоз [ссылка 7]. Некоторые исследования показывают, что наночастицы пластика могут даже проникать внутрь клеток растений, что открывает новые вопросы о внутриклеточной токсичности [12]. Например, в гидропонном эксперименте было показано, что рисовые сеянцы способны поглощать и транслоцировать наночастицы пластика [8].

Данные о транслокации микропластика в почве демонстрируют, что частицы могут перемещаться на глубину до 20 см за счет биотурбации почвенной фауны, такой как дождевые черви, а также вследствие агротехнических операций, что приводит к их распространению даже в слоях, не подвергавшихся прямому загрязнению [12].

Анализ научной литературы показывает, что влияние микропластика на растения зависит от множества параметров. Размер частиц играет важную роль. Чем мельче частицы, тем больше их удельная поверхность и, соответственно, потенциальная способность к адсорбции токсикантов и взаимодействию с клетками. Форма частиц (фибриллы, фрагменты, гранулы, пленки) также определяет характер их взаимодействия с корнями. Концентрация микропластика в среде – это ещё один критически важный фактор. При низких концентрациях может не наблюдаться никакого эффекта, тогда как при высоких возникает выраженная токсичность [7]. Важно и то, находится ли пластик в чистом виде или уже подвергался старению и деградации, так как состаренные частицы имеют более шероховатую поверхность и повышенную способность к выщелачиванию добавок.

## 2. Материал и методы исследований

Работа выполнена в 2025 году на базе лаборатории КГБУ ДО АКДЭЦ (<https://akdec.ru>). В качестве тест-объекта использовали семена редиса посевного *Raphanus sativus L.*, отличающегося высокой чувствительностью в оценке фитотоксического действия микропластика.

1. Пластик сортировали по видам:

PET (код 1), полиэтилентерефталат: бутылки для воды, напитков, тара для пищевых продуктов;

HDPE (код 2), полиэтилен высокой плотности: молочные бутылки, моющие средства, шампуни, контейнеры для пищи;

PVC (код 3), поливинилхлорид: трубы, оконные рамы, кабели, некоторые виды упаковки;

LDPE (код 4), полиэтилен низкой плотности: пакеты, пленки, защитные покрытия;

PP (код 5), полипропилен: емкости для йогурта, крышки, контейнеры для разогрева пищи;

PS (код 6), полистирол: одноразовая посуда, упаковка, подставки для яиц (вспененные);

OTHER (код 7), прочие пластики (включает смесь или редкие виды, например, поликарбонат, биопластик PLA и др.).

2. Пластик нарезали на кусочки 2-3х2-3 см (прил., рис. 1).

3. Пластик подвергали ультразвуковой обработке: 50 г пластика размещали в 600 мл водопроводной воды, подвергали обработке ультразвуком в течение 20 мин. при  $t\ 20\ ^\circ\text{C}$  (прил., рис.2). Ультразвуковая обработка осуществлялась в ультразвуковой ванне Stegler 10DT. Технические характеристики: объем – 10 л, частота УЗ – 40 кГц, мощность – 240 Вт.

4. Воду с микропластиком использовали для проращивания семян (прил., рис.3).

Проращивание проводили синхронно с 2-кратным повтором. В каждой группе использовали по 100 семян. Проращивали на фильтровальной бумаге (прил., рис.4). Контрольные группы проращивали с использованием водопроводной воды. Опытные группы с использованием воды с высоким содержанием микропластика. Во время исследований избегали контакта семян с пластиковыми изделиями. Учет показателей проращивания семян проводился согласно ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур на 3-и и 6-е сутки [1]. Микроскопический анализ частиц проводился с использованием светового микроскопа Микромед-3 вар.3-20. Статистическая обработка данных выполнена в программе Past 5.

### 3. Практическая часть

#### 3.1 Результаты исследований

Ультразвуковая обработка применялась для имитации естественных процессов физического разрушения пластиковых отходов в окружающей среде. В природных условиях макропластик подвергается постоянному механическому воздействию: волновое действие, трение о грунт, замерзание и оттаивание, разрушение и истирание поверхности в водоемах, а также антропогенные факторы (например, измельчение в коммунальных отходах). Эти процессы приводят к образованию фрагментов – постепенному дроблению крупных кусков пластика на более мелкие, формируя так называемый микропластик. Ультразвуковая ванна создаёт кавитационные пузырьки, которые при схлопывании генерируют локальные гидравлические удары, эффективно разрушающие поверхность полимеров и отслаивающие микрочастицы. Мы применили данный метод, чтобы смоделировать и ускорить естественный процесс деструкции пластика в лабораторных условиях. Ультразвук использовали, как источник механического стресса, который имитировал долгосрочное воздействие окружающей среды на пластиковые отходы.

Таблица 1 представляет результаты количественного и размерного анализа микрочастиц пластика в контрольной и опытной пробах воды, полученных при микроскопическом исследовании.

Таблица 1

Количественный и размерный анализ частиц микропластика

Показатель	Количество частиц в поле зрения, ед.		Размер частицы, D, ср., мкм	
	К	О	К	О
Микропластик	3,12±0,21	4,54±0,22***	3,10±0,15	4,47±0,15***

Примечание: \* -  $P \leq 0,05$ , \*\* -  $P \leq 0,01$ , \*\*\* -  $P \leq 0,001$

Механическое разрушение пластика (в данном случае – ультразвуковая обработка) приводит к образованию значимого количества микрочастиц, которые попадают в водную среду. Частиц микропластика в опытном образце оказалось количественно больше на 45,5%. Различия статистически значимы, что указывает на высокую достоверность увеличения концентрации частиц при обработке ультразвуком. Отмечено и увеличение размера самих частиц на 44,2%. Одновременно значение размера частиц в среднем так же остается в пределах, характерных для микропластика (не более 5 мкм), что является потенциально опасным для экосистем.

В таблице 2 представлено распределение микрочастиц по пределам размера.

Распределение количества микрочастиц по размерным классам, ед.

Группа	Предел размера, мкм						
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7 и более
К	3	21	88	23	10	6	5
О	0	19	110	59	19	10	13

Количественный анализ показал, что при воздействии ультразвука на пластик в опытной группе наблюдалось увеличение количества частиц размером 3 мкм и более. Мы объясняем это тем, что ультразвук вызывает отслоение крупных фрагментов с поверхности пластика, прежде чем они полностью дробятся. Вероятно, может происходить и, так называемая, агрегация мелких частиц в более крупные агломераты из-за механических колебаний. То есть, ультразвук активизирует процесс разрушения, но не обязательно приводит к формированию преимущественно мелких частиц. А также, в зависимости от условий, он может усиливать образование средних и крупных микрочастиц.

На рисунке 1 показано, что увеличение общего количества частиц в опытной группе обусловлено преимущественно ростом доли частиц в диапазоне 4-5 мкм.

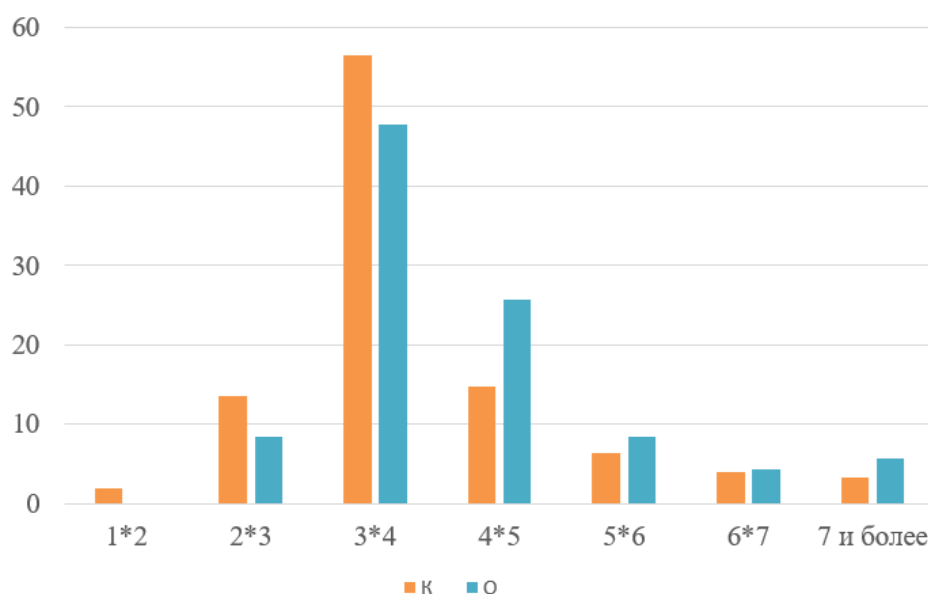


Рис. 1 Процентное распределение микрочастиц по размерным классам

Энергия прорастания и всхожесть являются ключевыми показателями жизнеспособности семян и отражают устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды. Редис (*Raphanus sativus* L.) относится к числу наиболее чувствительных сельскохозяйственных культур к воздействию микропластикового загрязнения. Поэтому оценка позволяет выявить

фитотоксическое действие микропластиковых частиц на ранних этапах роста и развития растений (таблица 3).

Таблица 3

Показатели энергии прорастания и всхожести семян редиса, %

Вид пластика	Энергия прорастания		Всхожесть	
	К	О	К	О
PET – 1	87	83	82	75
HDPE – 2	87	84	83	73
PVC – 3	85	84	83	81
LDPE – 4	82	88	73	78
PP – 5	75	78	61	72
PS – 6	86	83	80	77
OTHER – 7	90	80	81	68

Энергия прорастания отражает скорость и активность начальной стадии прорастания семян, что является важным индикатором жизнеспособности и стрессоустойчивости растений. Наиболее значительное снижение энергии прорастания наблюдалось при воздействии пластика OTHER (на 10%). При этом у пластика LDPE наблюдалось увеличение энергии прорастания на 6% по сравнению с контролем, что, вероятно, может свидетельствовать о нейтральном или даже слабо стимулирующем эффекте данного типа пластика. У PP энергия прорастания увеличилась на 3%, что также может указывать на его меньшую токсичность или полное отсутствие негативного влияния. Некоторое увеличение значения энергии прорастания при присутствии пластика LDPE и PP может быть связано с особенностями их химической структуры, что может косвенно влиять на водопоглощение семян.

Всхожесть является конечным показателем доли проросших семян и отражает общую жизнеспособность всей группы. Наибольшее снижение всхожести зафиксировано для пластиков OTHER (на 13%), HDPE (на 10%) и PET (на 7%), что указывает на высокую потенциальную токсичность этих типов микропластика. У LDPE и PP значение всхожести незначительно выросло (на 5% и 11%, соответственно), что говорит о меньшей токсичности этих видов пластика.

Важно отметить, что пластик PVC, несмотря на известную токсичность хлорированных соединений, показал абсолютно не значимое снижение всхожести, что может быть связано либо с низкой растворимостью его компонентов в воде либо с минимальным количеством выделяющихся веществ.

Таким образом, результаты оценки энергии прорастания и всхожести показали семена, что не все виды микропластика оказывают одинаковое влияние на прорастание редиса. Некоторые виды (например, LDPE и PP) не только не подавляют, но даже могут стимулировать процессы прорастания, вероятно, за счёт изменения физических свойств воды. Наряду с этим, пластики PET, HDPE,

OTHER и PS вызывают снижение, как энергии прорастания, так и всхожести и это может свидетельствовать об их потенциальной токсичности.

Фитомасса является объективным (обобщающим) показателем метаболической активности и адаптивных качеств растений, позволяющим оценить не только выживаемость, но и эффективность фотосинтеза, транспорта веществ и общего роста под воздействием стрессовых факторов. Измерение биомассы дает возможность выявить скрытые эффекты, которые не проявляются на ранних стадиях прорастания (таблица 4).

Таблица 4

Показатели фитомассы проростков редиса

Вид пластика	Фитомасса, г		
	К	О	Опыт в сравнении с контролем, %
PET – 1	13,81	13,46	-2,5
HDPE – 2	9,65	11,27	+17,4
PVC – 3	15,00	13,66	-8,9
LDPE – 4	12,72	11,24	-11,6
PP – 5	9,83	11,08	+12,7
PS – 6	13,22	11,80	-10,7
OTHER – 7	9,23	11,78	+27,6

Пластики HDPE, PP и OTHER вызывали значительное увеличение фитомассы, несмотря на возможное снижение всхожести у некоторых видов. При этом OTHER показал наибольший прирост массы (+27,6%), что, вероятно, может указывать на наличие в их составе компонентов, стимулирующих рост. У PVC, LDPE и PS наблюдалось выраженное снижение фитомассы. Некоторые виды пластиков, негативно влияющих на всхожесть семян, могут не угнетать, а даже способствовать росту уже проросших растений. Предположительно, это может указывать на различную токсичность на разных этапах жизненного цикла семени и проростка.

Таблица 5 содержит данные по длине корешка и ростка проростков редиса, а также коэффициенту симметрии. Этот показатель отражает соотношение между этими двумя частями растения и позволяет оценить степень баланса развития корневой и надземной системы, что является важным индикатором стрессового состояния растения.

Таблица 5

Морфометрические параметры проростков

Вид пластика	Контроль			Опыт		
	Длина, см		К симм.	Длина, см		К, симм.
	Корешок	Росток		Корешок	Росток	

PET – 1	4,55±0,27	6,08±0,16	0,75	6,14±0,35***	6,11±0,21	1,0
HDPE – 2	4,28±0,37	5,61±0,16	0,76	4,26±0,32	5,86±0,18	0,73
PVC – 3	4,33±0,26	5,97±0,19	0,73	4,46±0,25	5,45±0,15*	0,82
LDPE – 4	4,57±0,26	5,89±0,16	0,77	3,61±0,21**	5,79±0,18	0,62
PP – 5	3,62±0,28	5,72±0,23	0,63	4,4±0,35**	5,65±0,18	0,79
PS – 6	4,93±0,28	6,13±0,17	0,80	4,05±0,18**	5,83±0,16	0,70
OTHER – 7	4,01±0,20	5,58±0,18	0,72	3,99±0,17	5,95±0,16	0,67

Наиболее значительные изменения наблюдались в группе с пластиком PET. Длина корешка увеличилась на 40%, тогда как длина ростка осталась практически неизменной. В результате коэффициент симметрии достиг значения 1,0, максимального среди всех групп, что указывает на выраженное смещение в развитии в пользу корневой системы. При воздействии LDPE и PS отмечено достоверное снижение длины корешка на 28% и 19%, соответственно. При этом длина ростка изменялась незначительно. В группах этих видов пластиков наблюдалось снижение коэффициента симметрии. Для PP изменения длины органов были менее выражены, коэффициент симметрии увеличился (с 0,63 до 0,79), что может свидетельствовать о тенденции к усилению корнеобразования. Несмотря на высокую всхожесть и энергию прорастания, PVC оказал значимое угнетающее действие на рост надземной части проростков редиса, что проявилось в достоверном снижении длины ростка и снижении общей фитомассы. При этом корень развивался относительно нормально, что привело к повышению коэффициента симметрии. Таким образом, растение, вероятно, реагирует на стресс путем экономии ресурсов на ростке и направляя их на развитие корня в целях улучшения собственного питания.

Полученные данные по морфометрическим параметрам позволяют расширить понимание механизма влияния микрочастиц пластика на ранних этапах роста и развития редиса. Реакция растения на микропластик неоднозначна и зависит от типа пластика. Например, PET, вызвавший значительное увеличение длины корешка, так же демонстрировал снижение энергии прорастания и всхожести. Это может свидетельствовать о стрессовой адаптации: меньше семян прорастает, но те, которые проросли, активно формируют корневую систему, вероятно, в ответ на дефицит воды или питательных веществ, вызванный изменением свойств среды. При этом PET не увеличивает массу проростков, несмотря на рост корня. Это говорит о том, что усиленный рост корешка не сопровождается пропорциональным накоплением биомассы, что может быть связано с затратой энергии на стресс-ответ, а не на ростовые процессы.

В то же время, LDPE, который показал увеличение энергии прорастания и всхожести, в отношении промеров вызвал существенное угнетение корнеобразования и снижение коэффициента симметрии. Это противоречие указывает на разобщенность реакций растения на разных уровнях: высокая всхожесть не гарантирует нормальное развитие, особенно на этапе

формирования органов. Таким образом, LDPE может способствовать быстрому прорастанию, но препятствовать дальнейшему сбалансированному росту.

Пластик PP оказал выраженный стимулирующий эффект на развитие корневой системы проростков редиса. Увеличение коэффициента симметрии с 0,63 до 0,79 обусловлено, прежде всего, интенсивным ростом корешка, а не угнетением надземной части. PP положительно влиял на всхожесть и фитомассу, что подтверждает его относительную биобезопасность и даже потенциальную способность стимулировать определённые физиологические процессы у растений.

Анализируя и обобщая все результаты исследований, можно прийти к выводу, что ультразвуковая обработка эффективно моделирует естественные процессы механического разрушения пластиковых отходов, приводя к достоверному увеличению концентрации микрочастиц в водной среде. При этом образуются преимущественно частицы размером 3-5 мкм, что связано с отслоением крупных фрагментов с поверхности полимеров и, вероятно, частичной агрегацией более мелких частиц. Полученные микропластиковые частицы оказывают разнонаправленное влияние на растения в зависимости от химической природы пластика.

Наибольшую токсичность проявили PET, HDPE и смешанный микропластик (OTHER): они снижают энергию прорастания и всхожесть, что указывает на выраженную фитотоксичность на ранних этапах развития. Особенно выражено влияние OTHER, где зафиксировано наибольшее снижение всхожести (на 13%) на фоне максимального увеличения фитомассы (на 27,6), что может свидетельствовать о скрытом стрессе или наличии токсичных компонентов в смеси.

Пластики PVC и PS также оказывают негативное влияние: PVC угнетает рост надземной части и снижает фитомассу, что говорит о специфическом действии хлорсодержащих соединений; PS стабильно ухудшает всхожесть, биомассу и развитие корня.

LDPE, несмотря на повышение всхожести и энергии прорастания, вызывает резкое угнетение развития корня (на 28%), что делает его потенциально опасным для долгосрочной жизнеспособности растений. Таким образом, высокая всхожесть не гарантирует нормального развития.

Единственным полимером, проявившим комплексно положительное или нейтральное влияние, оказался полипропилен (PP). Он стимулирует всхожесть, увеличивает фитомассу и способствует развитию корневой системы без угнетения надземной части. Это позволяет рассматривать PP как наименее токсичный тип микропластика среди изученных.

## **Выводы**

1. Ультразвуковая обработка эффективно моделирует естественные процессы разрушения пластика и приводит к достоверному увеличению концентрации микрочастиц в водной среде и их укрупнению.

2. Микрочастицы разных полимеров оказывают неоднозначное влияние на прорастание семян редиса: PET, HDPE и OTHER вызывают явное снижение энергии прорастания и всхожести; LDPE и PP стимулируют эти показатели, что указывает на их относительную биобезопасность на ранних этапах развития.

3. Анализ морфометрических параметров выявил выраженные негативные эффекты у LDPE и PS, которые достоверно угнетают развитие корешка, несмотря на сохранение или даже повышение всхожести. При этом PET вызывал значительный рост корня без увеличения фитомассы, а PVC специфически угнетал надземную часть, что свидетельствует о стрессовой перестройке метаболизма у PET-семян и избирательной токсичности компонентов PVC по отношению к надземным органам.

4. Характер фитотоксического действия микрочастиц пластика напрямую зависит от их химического состава. Максимально выраженную токсичность проявил смешанный микропластик OTHER. На втором месте по токсичности находятся PET и HDPE. Пластики PVC и PS оказывают умеренно-токсическое влияние. LDPE, несмотря на положительные показатели всхожести и энергии прорастания, оказывает скрытое токсическое действие. Единственным полимером, проявившим комплексно положительное влияние, является PP (полипропилен).

## **Рекомендации и практические предложения**

1. Учитывая высокую токсичность пластиков OTHER, PET и HDPE, необходимо усилить отдельный сбор отходов и переработку пластиковых упаковок.

2. При выборе пластиковой тары для хранения продуктов, для выращивания рассады или других бытовых нужд предпочтение следует отдавать изделиям из PP.

3. Использование полиэтиленовой плёнки из LDPE, особенно в сельском хозяйстве и ландшафтном дизайне, требует осторожности и контроля за её разрушением.

4. PVC содержит потенциально опасные компоненты, угнетающие надземную часть растения, и его использование вблизи мест выращивания растений нежелательно.

## Список литературы

1. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Межгосударственный стандарт. – Текст : электронный. – М. : Стандартинформ, 2011 – 64 с. – Текст : электронный. – URL : [https://admin-new.nevacert.ru/files/gost\\_v2/gost\\_12038-84.pdf](https://admin-new.nevacert.ru/files/gost_v2/gost_12038-84.pdf) (дата обращения : 21.03.2025).
2. Варфоломеева, А. Е. Определение допустимой концентрации ПВХ-микропластика в почве по величине его миграции в растения / А. Е. Варфоломеева, А. О. Носова, Е. А. Хрипунова // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, [2024]. URL: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/13026> (дата обращения : 21.03.2025).
3. Исламова, С. В. Изучение воздействия микропластика на экосистемы / С. В. Исламова, Е. Ю. Микрюкова // Вестник науки. – 2024. – № 12 (81). – Т. 4. – С. 2122–2128. – Текст : электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-vozdeystviya-mikroplastika-na-ekosistemy> (дата обращения : 20.03.2025).
4. Комаров, С. М. Микропластик тысячелетия / С. М. Комаров // Химия и жизнь. – 2023. – № 11. – С. 16–21. – Текст : электронный. – URL: <https://hij.ru/read/32300/> (дата обращения: 05.04.2025).
5. Мешающий пластик // Новости сельского хозяйства. – 2023. – № 1. – С. 16–19. – Текст : электронный. – URL: <https://www.nsh.ru/menedzhment/meshayushhij-plastik/> (дата обращения: 05.04.2025).
6. Морачевская, Е. В. Источники и пути миграции микропластика в почве и растениях / Е. В. Морачевская // Проблемы агрохимии и экологии. – 2022. – № 1. – С. 40-49.
7. Попова, М. Микропластик ухудшил физико-химические свойства почвы / М. Попова // N+1. – 2021. – 3 февр. – Текст : электронный. – URL: <https://nplus1.ru/news/2021/02/03/microplastics-in-soil> (дата обращения: 05.04.2025).
8. Ручкина, К. В. Влияние микропластика на почву, как компонента окружающей среды и подходы к его определению: выпускная квалиф. работа / К. В. Ручкина.– Томск, 2023. – 156 с. – Текст : электронный. – URL : <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access%20manager/Repository/vital:17884> (дата обращения : 21.03.2025).
9. Франк, Ю. А. Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия / под общ. ред. Ю. А. Франк. – Томск: Издательство Томского государственного университета, 2022. – 132 с. – Текст : электронный. – URL: <https://microplasticsiberia.com/wp->

content/uploads/2022/08/Proceedings\_MPE-2022-1.pdf (дата обращения : 20.03.2025).

10. Яхьяева, М. Х. Влияние микропластических частиц на организм / М. Х. Яхьяева, И. Ф. Эргашева // Теория и практика современной науки. – 2022. – № 10 (88). – С. 197-204. – Текст : электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mikroplasticheskikh-chastits-na-organizm> (дата обращения : 20.03.2025).
11. Rillig, M. C. Microplastic effects on plants / M. C. Rillig, A. Lehmann, A. Abel de Souza Machado, G. Yang // *New Phytologist*. – 2019. – Vol. 223. – P. 1066–1070. – Текст : электронный. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/331867848\\_Microplastic\\_effects\\_on\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/331867848_Microplastic_effects_on_plants) (дата обращения: 05.04.2025).
12. Zhang, Y. Polyethylene microplastic: impacts on ryegrass seed germination and seedling development / Y. Zhang, X. Wang, J. Li et al. // *BMC Plant Biology*. – 2025. – Vol. 25. – Art. 876. – Текст : электронный. – URL: <https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-025-06891-2> (дата обращения: 05.04.2025).
13. Zhang, Y. Polyethylene microplastic: impacts on ryegrass seed germination and seedling development / Y. Zhang, X. Wang, J. Li et al. // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1226484. – Текст : электронный. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1226484/full> (дата обращения: 05.04.2025).

## Приложение



Рис.1 Подготовка пластика



Рис.2 Пластик в УЗ-ванне



Рис.3 Разные виды воды с микропластиком



Рис.4 Условия проращивания семян