

Министерство здравоохранения РФ
ФГБОУ ВО "Тверской государственный медицинский университет"
Минздрава РФ

Гимназия

Учебная дисциплина «Экология»

ПРОЕКТНАЯ РАБОТА

Изучение влияния микропластика на культурные растения

(на примере гороха посевного (лат. *Pisum sativum*))

Автор:

обучающаяся 10Б класса
Гаврилова Раиса Юрьевна

Руководитель проекта:

учитель географии
Сергеев Антон Романович

Допущена к защите:

Директор гимназии ТГМУ

(дата, подпись)

Тверь, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ПОЧВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ.....	5
1.1 Классификация и экотоксикологическая характеристика микропластика	5
1.2 Основные источники и пути аккумуляции микропластика в агрофере.	7
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИТОТОКСИЧНОСТИ МИКРОПЛАСТИКА	9
2.1 Методология модельного эксперимента по загрязнению почвы полимерными материалами.....	9
2.2 Анализ морфофизиологических параметров <i>Pisum sativum</i> в условиях полимерного загрязнения	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	24

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена глобальным загрязнением экосистем пластиковыми отходами, которые в процессе деградации образуют устойчивые полимерные частицы. Особую озабоченность вызывает их накопление в агросфере — ключевом звене обеспечения продовольственной безопасности. Основными источниками поступления полимерных материалов в почву являются осадок сточных вод (биосолиды), применяемый в качестве удобрения, и фрагменты сельскохозяйственной пластиковой мульчи. Хотя загрязнение почв микропластиком (частицами менее 5 мм) признано серьёзной проблемой, его прямое воздействие на растения, особенно на критически важные начальные стадии развития, изучено недостаточно по сравнению с водными экосистемами.

Понимание того, как различные типы полимеров влияют на прорастание и ранний рост сельскохозяйственных культур, является важной задачей для оценки потенциальных экологических рисков. Однако проведение исследований с нано- и микропластиком требует сложного лабораторного оборудования и методик. В этой связи **модельные эксперименты с макрочастицами полимеров** служат важным первым шагом, позволяющим выявить общие закономерности, грубые фитотоксические эффекты и отработать методику для последующих, более детальных исследований.

Объект исследования: проростки гороха посевного (*Pisum sativum*), выращиваемые в субстрате с микрочастицами полимерных материалов.

Предмет исследования: влияние включений различных типов полимеров (вспененный полистирол, полиэтилен, полиэтилентерефталат, поливинилхлорид) на лабораторную всхожесть семян и морфометрические параметры проростков гороха в условиях контролируемого модельного эксперимента.

Цель работы: провести сравнительную оценку влияния микрочастиц распространённых полимерных материалов на начальные стадии онтогенеза гороха посевного (*Pisum sativum*) в условиях лабораторного модельного эксперимента.

Задачи исследования:

- 1. Организовать и провести модельный вегетационный эксперимент,** включающий подготовку субстратов, загрязнённых микрочастицами (2–6 мм) различных полимеров (пенопласт, ПЭ, ПЭТ, ПВХ) и инертным вермикулитом (контроль), и выращивание в них гороха при контролируемых условиях.
- 2. Провести сравнительный анализ влияния полимерных включений** на ключевые параметры развития проростков: лабораторную всхожесть семян, длину корневой системы и высоту надземной части (побега), а также на фитосанитарное состояние субстрата.

Данная работа носит учебно-исследовательский характер и закладывает основу для понимания потенциального влияния пластикового загрязнения на растения, а также для планирования дальнейших экспериментов с частицами меньшего размера.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ПОЧВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

1.1 Классификация и экотоксикологическая характеристика микропластика

Микропластик представляет собой сложную смесь синтетических полимерных частиц разнообразной формы, размера и химического состава, диаметр которых не превышает 5 миллиметров [1]. Эти чрезвычайно стойкие загрязнители проникли во все экосистемы Земли, вызывая серьезную озабоченность в отношении их воздействия на экологию и здоровье человека, что делает борьбу с ними одной из ключевых задач современности.

Микропластик повсеместно обнаруживается в воде, почве, донных отложениях, живых организмах и даже в атмосфере [2]. Исследования его биологического воздействия на животных и растения активно развиваются. Существуют убедительные доказательства того, что люди постоянно подвергаются воздействию микропластика через пищу, воду и воздух [3]. Однако, несмотря на распространенность, прямые исследования влияния на здоровье человека ограничены, и большая часть данных получена путем экстраполяции результатов экспериментов на модельных организмах.

Хотя убедительных эпидемиологических данных о прямом вреде для человека пока нет, результаты корреляционных исследований среди групп населения, подверженных высоким концентрациям микропластика, а также эксперименты на животных и клеточных культурах указывают на потенциальные риски. К ним могут относиться провоцирование иммунных и стрессовых реакций, а также токсическое воздействие на репродуктивную функцию и развитие [4]. Для однозначных выводов необходимы более тщательные клинические исследования.

Пластмассы получили широкое распространение благодаря своим уникальным свойствам: легкости, прочности, устойчивости к коррозии и низкой стоимости. Однако именно их долговечность и недостаточная переработка привели к глобальному загрязнению окружающей среды. Термин «микропластик» был впервые введен в научный оборот Р.Томпсоном

и его коллегами в 2004 г. для описания мелких пластиковых фрагментов, обнаруженных в морской среде [5].

Классификация пластика по видам

1) Первичный микропластик — это частицы, изначально произведенные микроскопического размера. К ним относятся:

а) Микрогранулы в косметике: Твердые пластиковые сферы (часто из полиэтилена или полипропилена), которые используются в скрабах, зубных пастах и гелях для душа. После использования они попадают в канализацию, и, поскольку очистные сооружения не всегда способны их отфильтровать, они проникают в водоемы. Многие страны уже ввели запреты на их производство и продажу [6].

б) Синтетические волокна: микроскопические волокна, которые отделяются от текстиля (полиэстер, нейлон, акрил) в процессе стирки и носки. Одна стирка может выделить сотни тысяч таких волокон [7]. Они являются одним из доминирующих видов микропластика в окружающей среде.

в) Пластиковые гранулы (нурдлы): Сырье для производства пластиковых изделий. Попадают в окружающую среду из-за потерь при транспортировке и на производстве, массово накапливаясь на побережьях.

г) Абразивные частицы в моющих средствах: специально добавленные пластиковые частицы в некоторые чистящие пасты и средства для мойки.

2) Вторичный микропластик образуется в результате разрушения крупных пластиковых изделий (бутылок, пакетов, рыболовных сетей) под воздействием окружающей среды.

Главным фактором является фотодеградация — процесс разрушения полимерных цепей под воздействием ультрафиолетового излучения солнца [8]. УФ-лучи делают пластик хрупким, после чего ветер, волны и трение окончательно измельчают его на миллионы микроскопических фрагментов.

Классификация по размерам и связанные риски

Риски микропластика напрямую связаны с размером частиц. Чем они мельче, тем шире их распространение и потенциальная опасность (табл. 1).

Таблица 1

Распределение экологических рисков от каждого из видов микропластика по размерности частиц

Категория	Размерный диапазон	Потенциальная опасность и распространение
Крупный микропластик	1 мм – 5 мм	Поглощается крупными фильтраторами (мидии, устрицы) и рыбой, может вызывать механические повреждения ЖКТ.
Мелкий микропластик	1 мкм – 1 мм	Массово поглощается зоопланктоном — основой морских пищевых цепей. Легко переносится на большие расстояния.
Субмикропластик	100 нм – 1 мкм	Способен проникать через клеточные мембраны. Сложно обнаруживается стандартными методами.
Нанопластик	< 100 нм	Обладает высокой проникающей способностью [9].

Мелкие частицы, особенно волокна, легко переносятся по воздуху на континентальные расстояния. Нанопластик невозможно удалить стандартными методами очистки воды, а его обнаружение требует сложного и дорогостоящего оборудования.

1.2 Основные источники и пути аккумуляции микропластика в агро сфере

Если загрязнение водной среды, особенно морской, изучается с 1970-х годов, то проблема микропластика в почве стала активно исследоваться лишь в последнее десятилетие [10]. Исследования показывают, что микропластик не остается на месте, а мигрирует между экосистемами, накапливается в почве и может сорбировать другие загрязняющие вещества [11].

В 2018 г. в журнале «Nature» была опубликована одна из первых работ, посвященных загрязнению сельскохозяйственных почв. Исследование Пиеля

и его коллег в Германии выявило присутствие микропластика (в среднем 0,34 млн частиц/кг) даже на фермах, которые не использовали пластиковую мульчу или компост из осадка сточных вод. Это позволило ученым предложить установить фоновый уровень загрязнения для сельскохозяйственных угодий [12].

Выделяют следующие пути поступления микропластика в почвы:

1. Прямое поступление

а) Осушенный осадок сточных вод (Biosolids): Крупнейший источник. Этот осадок, богатый органикой и питательными веществами, широко используется в качестве удобрения в сельском хозяйстве. Однако он чрезвычайно концентрирован: очистные сооружения эффективно задерживают до 99% микропластика (особенно волокна из стирки), который накапливается в осадке. Внесение его на поля приводит к прямому и массивному загрязнению почв [13].

б) Сельскохозяйственная пластиковая мульча. Пластиковая пленка используется для прогрева почвы и борьбы с сорняками. После сезона ее сложно полностью удалить, и в почве остаются мелкие фрагменты. Исследования, в частности в Китае (где в 2015 году такой мульчей было покрыто более 20 млн гектаров), показывают прямую корреляцию между ее использованием и накоплением микропластика в почве [14].

в) «Оксо-разлагаемые» пластики, которые рекламируются как экологичная альтернатива, содержат добавки, ускоряющие их распад на мелкие фрагменты под солнцем. Однако в почве, куда попадают их остатки, УФ-излучение ограничено, и процесс дальнейшего разложения резко замедляется, приводя к накоплению микропластика [15].

2. Косвенное (опосредованное) поступление

Износ автомобильных шин. Истирание шин об асфальт — один из самых значительных по объему источников микропластика в целом [16]. Резиновые частицы (содержащие синтетические полимеры) оседают вдоль дорог и смываются дождями на соседние поля и в водоемы.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИТОТОКСИЧНОСТИ МИКРОПЛАСТИКА

2.1 Методология модельного эксперимента по загрязнению почвы полимерными материалами

Загрязнение почвы микропластиком — это многоуровневая угроза. Физически частицы изменяют структуру почвы, влияя на ее плотность, водоудерживающую способность и аэрацию. Химически они могут выступать как векторы для *persistent organic pollutants* (стойких органических загрязнителей) и тяжелых металлов, а также выделять собственные добавки (пластификаторы, антипирены). Биологически микропластик воздействует на почвенную фауну (дождевых червей, ногохвосток) и микробные сообщества, нарушая процессы разложения органики и круговорот питательных веществ. В итоге, это ставит под угрозу здоровье почв, продуктивность агроэкосистем и, возможно, безопасность пищевых цепей.

Исследование этой проблемы — сложнейшая аналитическая задача. Почва как матрица невероятно гетерогенна: она содержит органическое вещество, песок, глину, гумус, корни, остатки организмов, которые могут маскировать, адсорбировать или по свойствам имитировать микропластик. Поэтому разработка и применение надежных, точных и воспроизводимых методов анализа являются краеугольным камнем для оценки масштабов загрязнения, понимания судьбы и трансформации частиц и прогнозирования экологических последствий.

В рамках данной учебно-исследовательской работы был проведён модельный эксперимент для первичной оценки влияния микрочастиц распространённых полимеров на начальные стадии онтогенеза растения-индикатора. Методика позволяет выявить грубые морфофизиологические реакции и служит основой для планирования более детальных исследований с микропластиком в строгом смысле этого термина.

Название эксперимента: Оценка влияния различных типов микропластика на начальные стадии роста и развития гороха посевного (лат. *Pisum sativum*) в контролируемых условиях.

Цель эксперимента: Наблюдение за морфофизиологическими реакциями проростков гороха при внесении в субстрат частиц различных полимерных материалов.

I. Подготовка материалов и экспериментальных образцов

- 1) Вермикулит: Использован как инертный контрольный материал, не являющийся пластиком. Просеян для получения фракции 1-3 мм.
- 2) Пенопласт (вспененный полистирол, EPS): Чистый кусок упаковки механически раздроблен в ступке и просеян. Отобрана фракция 2-5 мм.
- 3) Поливинилхлорид (ПВХ): Взяты образцы чистых гранул. Измельчены с помощью резака или дробилки до размера 1-4 мм.
- 4) Полиэтиленовый пакет (ПЭ низкой плотности, LDPE): Пакет нарезан на мелкие фрагменты (~5x5 мм) с помощью ножниц.
- 5) Пластиковая бутылка (ПЭТ, полиэтилентерефталат): Бутылка очищена от этикетки, разрезана и измельчена до чешуек размером 2-6 мм.

II. Подготовка растительных сосудов и субстрата:

- 1) Подготовлено 45 одинаковых посадочных ячеек объемом 250.
- 2) Приготовлен стандартный универсальный торфяной субстрат, однородный по составу.
- 3) Для каждой из 5 опытных групп проведено смешивание (на 1 ячейку):
 - Группа 1 (Контроль-вермикулит): 53 г субстрата + 25 г вермикулита.
 - Группа 2 (Пенопласт): 53 г субстрата + 25 г частиц полистирола.
 - Группа 3 (ПВХ): 53 г субстрата + 25 г частиц.
 - Группа 4 (Полиэтилен): 53 г субстрата + 25 г фрагментов ПЭ-пакета.
 - Группа 5 (ПЭТ): 53 г субстрата + 25 г чешуек ПЭТ.
- 4) Каждую смесь тщательно перемешивали вручную в каждой ячейке для достижения максимально равномерного распределения частиц в объеме.

III. Подготовка семян:

1. Отобраны однородные, неповрежденные семена гороха одного сорта и партии.
2. Семена промыты дистиллированной водой и замочены на влажной фильтровальной бумаге на 24 часа для набухания и начала прорастания.
3. Закладка и проведение эксперимента.

IV. Посадка:

- Каждый из 15 горшков заполнен соответствующей подготовленной почвенной смесью.
- В центр каждого горшка на одинаковую глубину (2 см) высажено по 1 семени гороха.
- Горшки промаркированы с указанием группы и номера повторности.
- Горшки расставлены на одном поддоне в рандомизированном порядке (для исключения влияния микроклиматических градиентов на стеллаже).

Условия выращивания:

1. Световой режим: Фотопериод 7/5 часов (день/ночь). Освещенность 220 °С
2. Температурный режим: $+23\pm 2^{\circ}\text{C}$ днем, $+18\pm 2^{\circ}\text{C}$ ночью.
3. Полив: осуществляется регулярно одинаковым объемом отстоянной водопроводной воды для поддержания оптимальной и равной влажности субстрата во всех вариантах и минимизации вымывания частиц.

Наблюдения и измерения (Ход эксперимента).

Наблюдения проводились ежедневно, ключевые измерения — на 21 (рис. 1), 42 (рис. 2) и 63 день (рис. 3) после появления всходов (полные семядоли над поверхностью).



Рис. 1. Фотофиксация всхожести образцов гороха на 21 день



Рис. 2. Фотофиксация всхожести образцов гороха на 42 день

А. Морфометрические измерения:

- Высота растения: измерялась линейкой от корневой шейки до точки роста главного стебля.
- Длина корневой системы: после окончания эксперимента (63 день) растения аккуратно извлекались, корневая система отмывалась от субстрата. Измерялась длина основного корня.

В. Визуальная фиксация.

- ✓ Ежедневно фиксировалось общее состояние растений: окраска листьев (появление хлорозов, некрозов), тургор, геотропическая ориентация стебля.
- ✓ Отмечались видимые аномалии развития: искривление гипокотилия, утолщения корней, деформации листовых пластинок.
- ✓ Проводилась детальная фотосъемка растений из каждой группы на ключевые даты.
- ✓ Особое внимание уделялось поведению корневой системы при извлечении: наличие видимых адгезий (прилипаний) корней к частицам пластика, изменение цвета корней в зоне контакта, характер распределения корней в объеме горшка (например, склонность избегать зон со скоплением частиц или, наоборот, оплетать их).

С. Мониторинг состояния субстрата:

- ✓ Отмечалась скорость высыхания поверхности субстрата в разных ячейках.
- ✓ При извлечении растения визуально оценивалось состояние почвенной смеси: наличие или отсутствие плесени, изменение структуры, агрегации.

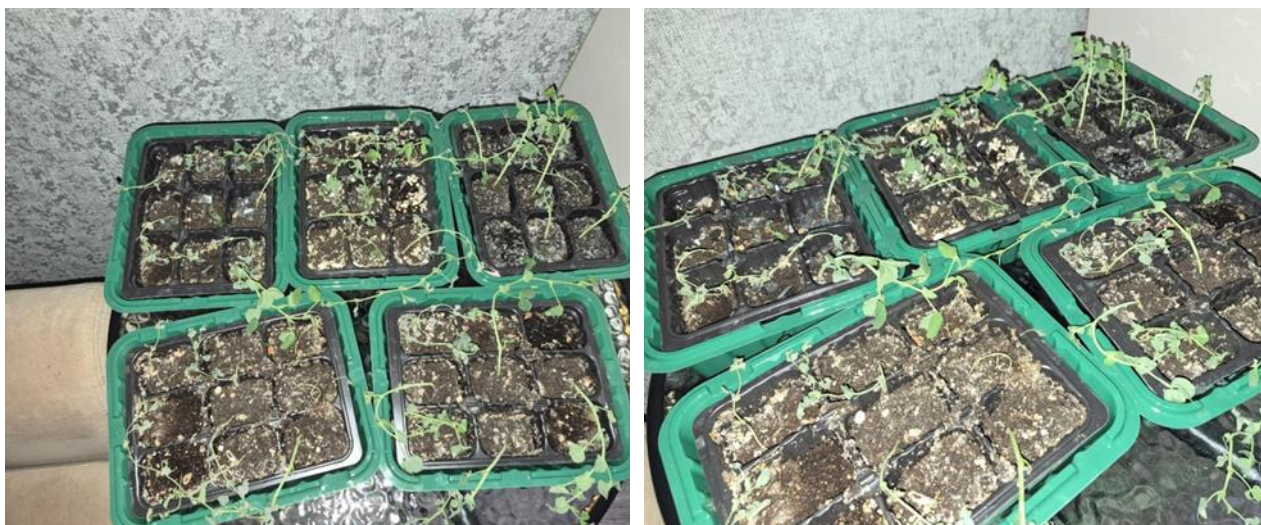


Рис. 3. Фотофиксация всхожести образцов гороха на 63 день

Количественные результаты морфометрических измерений, проведённых на 63-й день эксперимента, систематизированы в табл. 2. Полученные данные позволяют провести сравнительный анализ влияния различных полимерных материалов на ключевые показатели развития *Pisum sativum*: длину корневой системы и высоту надземной части (ростка)

Таблица 2

Сравнительная характеристика развития проростков гороха и фитосанитарного состояния в субстратах с различными полимерными включениями на 63 день

Вид	Тип пластика	Номер пробы		Корень, см		Росток, см		Плесень	
Горох	1 ячейка - вермикулит	1	5	7	2	16	21	-	-
		2	6	-	9	-	11	+	-
		3	7	-	-	-	-	+	+
		4	8	1	-	14	-	-	+
			9		3		9		-
	2 ячейка - пенопласт	1	5	4	1,5	5	6	-	-
		2	6	4	-	10	-	-	+
		3	7	10	7	24	17	-	-
		4	8	9	4	17	12	-	-
			9		3		13		-
	3 ячейка - полиэтиленовый пакет	1	5	7	12	11	19	-	-
		2	6	11	9	18	19	-	-
		3	7	10	-	10	-	-	+
		4	8	-	9	-	19	+	-
			9		-		-		+
	4 ячейка - полиамидхлорид	1	5	-	4	-	18	+	-
		2	6	6	4	9	17	-	-
		3	7	3	10	13	14	-	-
		4	8	9	7	21	10	-	-
			9		6		18		-

5 ячейка - полиэтилентерефталата	1	5	2	-	5	-	-	+
	2	6	3	15	12	18	-	-
	3	7	10	14	14	11	-	-
	4	8	3	4	12	8	-	-
		9		20		14		-

2.2 Анализ морфофизиологических параметров *Pisum sativum* в условиях полимерного загрязнения

Результаты эксперимента, представленные в виде систематизированных данных в таблице 2 и серии фотофиксаций (Рис. 1–3), позволяют перейти к детальному анализу реакции растений на различные типы полимерных включений. В данном разделе проводится сравнительная оценка лабораторной всхожести, морфометрических параметров (длина корневой системы и высота надземной части), а также фитосанитарного состояния субстрата для каждой из пяти опытных групп. Такой пошаговый разбор направлен на выявление специфического влияния каждого материала — от инертного вермикулита до частиц пенопласта, полиэтилена, ПВХ и ПЭТ — на ключевые этапы раннего онтогенеза гороха посевного.

1 ячейка. Анализ группы с вермикулитом (контроль с инертным субстратом)

Лабораторная всхожесть и выживаемость проростков: В контрольной группе зафиксирована **частичная лабораторная всхожесть**, составившая 55.6% (полноценное развитие корневой системы и гипокотилия отмечено в пяти из девяти повторностей — пробы №1, №4, №5, №6, №9). В четырех повторностях (№2, №3, №7, №8) семена либо не проросли, либо развитие проростков было аномальным и остановилось на ранней стадии.

Морфометрические параметры: у проросших растений наблюдался **выраженный морфофизиологический дисбаланс**. Средние и максимальные показатели длины побега (ростка) достоверно превышали

аналогичные показатели корневой системы. Корневая система характеризовалась слабым развитием, что свидетельствует о возможном угнетении ризогенеза в используемом субстрате даже в отсутствие полимерных загрязнителей.

Микробиологическое состояние субстрата: В данной группе отмечен **наиболее высокий уровень микробиологического загрязнения** — признаки развития микромицетов (плесени) визуально зафиксированы в 50% повторностей (пробы №2, №3, №7, №8). Наблюдалась прямая корреляция между наличием обильного мицелия и полным отсутствием развития растения (наиболее выраженный случай — проба №3). Это указывает на то, что в условиях эксперимента вермикулит, вероятно, способствовал поддержанию повышенной влажности и созданию благоприятных условий для развития грибковой микрофлоры, что стало лимитирующим фактором для прорастания и нормального онтогенеза гороха.

2 ячейка. Анализ группы с частицами пенопласта (вспененный полистирол, EPS)

Лабораторная всхожесть и выживаемость проростков: В данной опытной группе была зафиксирована **максимальная лабораторная всхожесть** среди всех вариантов опыта, достигшая **88.9%** (восемь из девяти повторностей). Полноценное развитие с формированием как корневой системы, так и надземной части наблюдалось в пробах №1-№5, №7-№9. Единственная реплика, не показавшая развития (проба №6), визуальнo отличалась наличием микробиологического загрязнения субстрата.

Морфометрические параметры: Проростки в этой группе характеризовались **умеренным, но стабильным и сбалансированным развитием**. Вариабельность морфометрических показателей находилась в ожидаемом диапазоне: длина корней составляла 4–10 см, длина побегов — 5–24 см. Наибольшие значения были отмечены в повторности №3 (длина корня

10 см, длина побега 24 см), что может указывать на оптимальные для развития условия именно в этой реплике. Важно отметить отсутствие выраженного дисбаланса в развитии подземной и надземной частей растения, что свидетельствует об отсутствии явного стрессового воздействия данного типа полимера на процессы ризогенеза и роста побега.

Микробиологическое состояние субстрата: Микробиологическая обстановка в субстрате с пенопластом была наиболее благоприятной. Признаки развития микромицетов были визуально зафиксированы лишь в одной повторности (№6), где их наличие, по всей видимости, и стало лимитирующим фактором, полностью подавившим прорастание семени. В остальных восьми пробах субстрат сохранял стабильное фитосанитарное состояние на протяжении всего эксперимента.

3 ячейка Анализ группы с фрагментами полиэтиленового пакета (ПЭ низкой плотности, LDPE)

Лабораторная всхожесть и выживаемость проростков: В группе с полиэтиленом была отмечена высокая, но неполная лабораторная всхожесть, составившая 66.7% (шесть из девяти повторностей — №1, №2, №3, №5, №6, №8). В трех повторностях (№4, №7, №9) семена либо не проросли, либо развитие проростков было остановлено на ранней стадии без формирования видимых вегетативных органов.

Морфометрические параметры: Проростки, успешно развившиеся в данной среде, продемонстрировали наиболее высокие показатели развития корневой системы среди всех опытных групп. Длина корней варьировалась от 7 до 12 см, при этом максимальное значение (12 см, повторность №1) являлось абсолютным максимумом эксперимента. Развитие надземной части также было интенсивным и сопоставимо с лучшими показателями в других группах. Это указывает на то, что в отсутствие негативных факторов (таких как микробиологическое загрязнение)

полиэтиленовый субстрат не оказывал выраженного ингибирующего влияния на морфогенез гороха.

Микробиологическое состояние субстрата: В данной группе наблюдался **повышенный уровень микробиологического загрязнения**. Признаки развития микромицетов были зафиксированы в 33.3% повторностей (№4, №7, №9). Примечательно, что именно эти пробы характеризовались полным отсутствием развития растений, что свидетельствует о сильной корреляции между появлением плесени и подавлением прорастания семян в субстрате с полиэтиленом.

4 ячейка. Анализ группы с частицами полиамидхлорида (ПВХ)

Лабораторная всхожесть и выживаемость проростков: В группе с полиамидхлоридом была зафиксирована **неполная лабораторная всхожесть** на уровне **44.4%** (полноценное развитие наблюдалось в четырёх из девяти повторностей — №2, №3, №4, №6). В двух повторностях (№1 и №5) семена не проросли, при этом в одной из них (№1) было отмечено микробиологическое загрязнение субстрата. Отсутствие видимых причин для отсутствия развития в пробе №5 может указывать на возможное наличие иных стрессовых факторов или внутренних дефектов семенного материала.

Морфометрические параметры: Проростки, успешно преодолевшие стадию прорастания, характеризовались **хорошим и стабильным развитием с акцентом на ростовую часть**. Надземная часть растений развивалась интенсивно, демонстрируя высокие показатели длины побега (диапазон 9–21 см). Развитие корневой системы было умеренным (длина корней 3–10 см) и более сдержанным по сравнению с ростом побега. Данный морфологический паттерн может свидетельствовать о том, что полиамидхлорид в меньшей степени влияет на энергетически затратный процесс роста стебля и листьев, но может оказывать лёгкое ингибирующее или модифицирующее действие на развитие корневой системы.

Микробиологическое состояние субстрата: Субстрат с полиамидхлоридом отличался **благоприятным фитосанитарным состоянием**. Явные признаки развития микромицетов были визуально зафиксированы лишь в одной повторности (№1), где они, вероятно, и стали причиной отсутствия всхожести. Общая низкая распространённость плесени в данной группе позволяет предположить, что сам материал не способствует активному развитию грибковой микрофлоры.

5 ячейка. Анализ группы с частицами полиэтилентерефталата (ПЭТФ)

Лабораторная всхожесть и выживаемость проростков: В данной группе была достигнута **высокая лабораторная всхожесть**, составляющая **88.9%** (восемь из девяти повторностей — №1-№4, №6-№9). Полноценное развитие с формированием всех вегетативных органов наблюдалось в семи повторностях. Отсутствие развития в единственной пробе №5 не было связано с видимым микробиологическим загрязнением, что может указывать на иные причины (например, локальные условия в субстрате или скрытый дефект семени).

Морфометрические параметры: Морфометрические показатели проростков в этой группе отличались **наибольшей вариабельностью и неравномерностью** среди всех опытных вариантов. Наблюдался экстремально широкий разброс значений: длина корней варьировалась от минимальных в эксперименте 2–3 см до рекордных 20 см (повторность №9), а длина побегов — от 5 до 18 см. При этом отдельные растения (например, повторность №2 с корнем 15 см и побегом 18 см) демонстрировали сбалансированное и интенсивное развитие. Такая высокая гетерогенность результатов свидетельствует о неоднородном или непредсказуемом воздействии частиц ПЭТ на индивидуальные растения, которое может варьировать от нейтрального до стрессового в зависимости от неустановленных микрокондиций внутри субстрата.

Микробиологическое состояние субстрата: Субстрат с полиэтилентерефталатом характеризовался **хорошим фитосанитарным состоянием**. Визуальные признаки развития микромицетов были отмечены лишь в одной повторности (№1), где их наличие, вероятно, стало причиной частичного угнетения развития (в данной пробе отсутствовал побег). Низкая распространённость плесени позволяет исключить её как системный негативный фактор для данной группы.

Итоговый аналитический вывод

1. **Прямая фитотоксичность** в виде подавления прорастания и роста в условиях данного эксперимента была наиболее выражена в контрольной группе (**вермикулит**), что ставит под сомнение его инертность и указывает на артефакты, вызванные методикой (возможно, переувлажнением).
2. Среди исследуемых полимеров **наименее негативное воздействие** на ранний онтогенез гороха оказал **вспененный полистирол (пенопласт, EPS)**, обеспечивший максимальную, стабильную всхожесть и сбалансированное развитие проростков при минимальном микробиологическом загрязнении.
3. **Полиэтилен (LDPE) и полиэтилентерефталат (ПЭТ)** показали противоречивые эффекты: способность не угнетать, а в отдельных случаях даже стимулировать ростовые процессы у выживших растений, но сочетающуюся с повышенным риском неудачи прорастания (для LDPE — из-за плесени, для ПЭТ — по неустановленным причинам).
4. **Полиамидхлорид (ПВХ)** проявил себя как материал, создающий умеренно стрессовые условия, выразившиеся в низкой всхожести и дисбалансе развития в пользу надземной части у проросших растений.

Результаты свидетельствуют, что влияние полимерного материала на растение является комплексным и определяется не только его химической природой, но и физической структурой, которая опосредованно влияет на

водно-воздушный режим и микробиологическую активность субстрата. В рамках данной модели **пенопласт (EPS)** может рассматриваться как наименее дестабилизирующий фактор для начальных этапов развития гороха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование было направлено на сравнительную оценку влияния микрочастиц распространённых полимерных материалов на начальные этапы онтогенеза гороха посевного (*Pisum sativum*) в рамках лабораторного модельного эксперимента. Для реализации поставленных задач, был организован и проведён вегетационный опыт, а также осуществлён сравнительный анализ влияния различных полимерных включений на развитие проростков.

В результате исследования были получены следующие основные выводы:

- 1) **Наиболее благоприятные условия для массового и надёжного проращивания семян** в условиях данного эксперимента создавал субстрат с частицами **вспененного полистирола (пенопласта, EPS)**. Данная группа показала максимальную лабораторную всхожесть (88,9%), стабильное и сбалансированное развитие как корневой системы, так и надземной части проростков, а также минимальный уровень микробиологического загрязнения субстрата. Это позволяет рассматривать пенопласт как полимер, оказывающий **наименьшее дестабилизирующее воздействие** на ранний онтогенез гороха в рамках применённой модели.
- 2) **Полиэтилен (LDPE) и полиэтилентерефталат (ПЭТ)** продемонстрировали **противоречивый эффект**. С одной стороны, у успешно проросших в этих средах растений отмечались высокие, а в отдельных случаях рекордные морфометрические показатели. С другой стороны, в этих группах наблюдался повышенный риск неудачи прорастания, связанный для полиэтилена с развитием плесени, а для ПЭТ — с высокой вариабельностью условий, приводящей к неравномерному развитию проростков. Это указывает на **непредсказуемость и потенциальную стрессогенность** их воздействия.

- 3) **Поливинилхлорид (ПВХ)** проявил себя как материал, создающий **умеренно стрессовые условия для прорастания**, что выразилось в самой низкой всхожести (44,4%) среди опытных групп с полимерами. Однако проростки, преодолевшие стадию прорастания, демонстрировали хорошее развитие надземной части при относительно слабой корневой системе, что указывает на возможное **избирательное угнетение ризогенеза**.
- 4) **Неожиданным результатом** стало то, что наихудшие показатели по всем параметрам (всхожесть 55,6%, сильный дисбаланс развития, максимальное поражение плесенью) были зафиксированы в **контрольной группе с вермикулитом**. Этот факт ставит под сомнение его полную инертность в условиях данного опыта и свидетельствует о том, что сам экспериментальный субстрат мог выступать **дополнительным стресс-фактором**, требующим оптимизации в будущих исследованиях.

Таким образом, результаты подтверждают, что влияние полимерного материала на растение является **комплексным**. Оно определяется не только химическим составом полимера, но и, что особенно важно в данном эксперименте, его **физической структурой**, которая опосредованно влияет на водно-воздушный режим, фитосанитарное состояние субстрата и, как следствие, на успешность прорастания и развития проростков.

Выполненная работа носит **учебно-исследовательский характер** и служит важным первым этапом в изучении проблемы. Она демонстрирует методологический подход к моделированию загрязнения и выявляет грубые морфофизиологические реакции растения-индикатора. Полученные данные и отработанная методика создают основу для планирования более детальных исследований, направленных на изучение влияния **частиц микропластика** в строгом смысле этого термина, а также механизмов их воздействия на физиолого-биохимические процессы в растениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н.Г. Зырина, С.В. Головатого. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – 62 с.
2. Руководство по определению показателей качества почв и растений методом биотестирования. – М.: Изд-во МГУ, 2015. – 145 с.
3. Микро- и нанопластик: происхождение, источники поступления и влияние на здоровье человека | Газеев | Гигиена и санитария - Том 104, № 10 (2025)
4. Boots, B. Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground / B. Boots, C.W. Russell, D.S. Green // *Environmental Science & Technology*. – 2019. – Vol. 53, № 19. – P. 11496–11506.
5. Cox, K.D. Human Consumption of Microplastics / K.D. Cox, G.A. Covernton, H.L. Davies, J.F. Dower, F. Juanes, S.E. Dudas // *Environmental Science & Technology*. – 2019. – Vol. 53, № 12. – P. 7068–7074.
6. Crossman, J. Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment / J. Crossman, R. Hurley, M. Futter, L. Nizzetto // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 724. – Art. 138334.
7. De Falco, F. Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics / F. De Falco, M.P. Gullo, G. Gentile, E. Di Pace, M. Cocca, L. Gelabert, M. Brouta-Agnésa, A. Rovira, R. Escudero, R. Villalba // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 236. – P. 916–925.
8. de Souza Machado, A.A. Microplastics can change soil properties and affect plant performance / A.A. de Souza Machado, W. Kloas, C. Zarfl, S. Hempel, M.C. Rillig // *Environmental Science & Technology*. – 2019. – Vol. 53, № 10. – P. 6044–6052.

9. European Bioplastics. Fact Sheet: "Oxo-degradable" plastics. – Berlin, 2017. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.european-bioplastics.org/> (дата обращения: 01.01.2026).
10. Gigault, J. Current opinion: What is a nanoplastic? / J. Gigault, H. El Hadri, B. Nguyen, B. Grassl, L. Rowenczyk, N. Tufenkji, S. Feng, M. Wiesner // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 235. – P. 1030–1034.
11. Horton, A.A. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities / A.A. Horton, A. Walton, D.J. Spurgeon, E. Lahive, C. Svendsen // *Science of the Total Environment*. – 2017. – Vol. 586. – P. 127–141.
12. Hüffer, T. Sorption of organic compounds by aged polystyrene microplastic particles / T. Hüffer, T. Hofmann // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 236. – P. 218–225.
13. Kole, P.J. Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment / P.J. Kole, A.J. Löhr, F.G.A.J. Van Belleghem, A.M.J. Ragas // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2017. – Vol. 14, № 10. – Art. 1265.
14. Napper, I.E. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics / I.E. Napper, R.C. Thompson // *Marine Pollution Bulletin*. – 2015. – Vol. 99, № 1–2. – P. 178–185.
15. Piehl, S. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland / S. Piehl, A. Leibner, M.G.J. Löder, R. Dris, C. Bogner, C. Laforsch // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – Art. 17950.
16. Prata, J.C. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects / J.C. Prata // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 702. – Art. 134455.
17. Rillig, M.C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? / M.C. Rillig // *Environmental Science & Technology*. – 2012. – Vol. 46, № 12. – P. 6453–6454.

18. Rillig, M.C. Microplastic transport in soil by earthworms / M.C. Rillig, R. Lehmann // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – Art. 1362.
19. Thompson, R.C. Lost at sea: where is all the plastic? / R.C. Thompson, Y. Olsen, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W.G. John, D. McGonigle, A.E. Russell // *Science*. – 2004. – Vol. 304, № 5672. – P. 838.
20. Zhang, G.S. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China / G.S. Zhang, Y.F. Liu // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 642. – P. 30–39.