

Физическая география и геоэкология

УДК 504.064.3

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2026-2-65-73>

Влияние микрочастиц полимеров на ранний онтогенез гороха посевного (*Pisum sativum* L.) в условиях модельного эксперимента

А.Р. Сергеев¹

ФГБУН Институт водных проблем РАН, Москва

Проведена сравнительная оценка влияния микрочастиц полимеров (вспененный полистирол, ПЭНП, ПВХ, ПЭТ) на ранний онтогенез *Pisum sativum* L. в условиях 63-суточного модельного эксперимента. Ни один из исследованных полимеров не оказал статистически значимого ингибирующего воздействия на всхожесть и морфометрию проростков; выявлена полимер-специфичность растительных реакций. Установлено, что влияние микропластика определяется комплексом факторов: физико-химическими свойствами субстрата, микробиологическим статусом ризосферы и фенотипической пластичностью растения-индикатора. **Ключевые слова:** микропластик, фитотоксичность, горох посевной, модельный эксперимент, почвенные экосистемы, ранний онтогенез растений, полимерные загрязнения.

Введение и постановка проблемы

Глобальное загрязнение окружающей среды пластиковыми отходами, подвергающимися физической, химической и биологической фрагментации, привело к повсеместному накоплению микропластика (частиц <5 мм) во всех компонентах биосферы [1,2]. В отличие от водных экосистем, где токсикологическое воздействие полимеров изучено достаточно подробно, почвенные агроценозы остаются наименее исследованным резервуаром [3,10]. Почва аккумулирует микропластик как за счёт прямых антропогенных потоков (внесение осадков сточных вод [5,13], деградация сельскохозяйственной мульчи [14], использование «оксо-разлагаемых» материалов [8]), так и опосредованно (атмосферный перенос, смыв частиц износа автомобильных шин [12]). Благодаря высокой площади поверхности и сорбционной активности, микропластик способен выступать вектором для тяжёлых металлов и стойких органических загрязнителей [11], формируя кумулятивный токсический эффект («химический троянский конь») и нарушая биогеохимические циклы [7].

Ключевой пробел современных знаний заключается в недостаточной изученности фито- и фитотоксических эффектов

микропластика на критически ранних стадиях онтогенеза культурных растений, когда закладывается потенциал продуктивности и устойчивости фитоценоза [3,7]. В связи с этим, модельные эксперименты с использованием стандартизированных субстратов представляют собой необходимый этап для выявления общих закономерностей взаимодействия полимерных включений с растительным организмом [2,16].

Цель работы: проведение сравнительной оценки влияния микрочастиц распространённых полимерных материалов на начальные стадии онтогенеза гороха посевного (*Pisum sativum* L.) в условиях контролируемого лабораторного эксперимента.

Задачи: 1) организация и проведение модельного вегетационного эксперимента; 2) сравнительный анализ влияния полимерных включений на лабораторную всхожесть семян и морфометрические параметры проростков.

Результаты экспериментального исследования фитотоксичности микропластика

Методология модельного эксперимента по загрязнению почвы полимерными материалами.

Для оценки потенциальной фитотоксичности полимерных включений был реализован контролируемый модельный эксперимент с использованием растения-индикатора *Pisum sativum* L. Выбор данной культуры обусловлен её высокой чувствительностью к абиотическим стрессорам, стандартизированной методикой биотестирования [2] и репрезентативностью для бобовых агроценозов.

Экспериментальная схема включала пять вариантов с девятью биологическими повторностями в каждом:

- **Контроль:** вермикулит (фракция 1–3 мм) как инертный минеральный субстрат;
- **Опытные группы:** полимерные наполнители фракции 1–6 мм — вспененный полистирол (EPS, 2–5 мм), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП/LDPE, ~5 мм), поливинилхлорид (ПВХ, 1–4 мм), полиэтилентерефталат (ПЭТ, 2–6 мм).

Доля полимерного компонента в субстрате составляла ~32% от общей массы (25 г наполнителя на 53 г торфяного субстрата), что моделирует условия выраженного локального загрязнения [7, 14]. Выращивание осуществлялось в течение 63 суток при стандартизированных параметрах: фотопериод 7/5 ч (день/ночь), освещённость 8000–10000 лк, температурный режим +23±2°C (день) / +18±2°C (ночь), дозированный полив отстоянной водопроводной водой для поддержания равной влажности во всех вариантах.

Регистрируемые параметры:

- 1) Лабораторная всхожесть семян (%);

- 2) Морфометрические показатели проростков на 63-е сутки: длина главного корня и надземного побега (см);
- 3) Фитосанитарное состояние субстрата (визуальная оценка наличия микромицетов);
- 4) Качественные признаки морфофизиологического статуса: тургор, хлороз, геотропическая ориентация.

Анализ морфофизиологических параметров *Pisum sativum* в условиях полимерного загрязнения

Результаты визуального мониторинга на протяжении эксперимента (рис. 1–3) демонстрируют дифференцированную динамику прорастания семян и развития проростков в зависимости от типа полимерного наполнителя. На 21-й день эксперимента (рис. 1) наиболее активное прорастание наблюдалось в группах с вспененным полистиролом и ПЭТ, тогда как в контрольной группе и варианте с ПВХ отмечалась задержка появления всходов. К 42-му дню (рис. 2) различия в морфологическом статусе растений стали более выраженными: в опытных группах с EPS и LDPE сформировались развитые проростки с выраженным тургором, тогда как в контроле сохранялись признаки угнетения роста. На заключительном этапе наблюдения (63 день, рис. 3) зафиксированы максимальные различия в морфометрических показателях между экспериментальными группами.



Рис. 1. Всхожесть образцов на 21 день



Рис. 2. Всхожесть образцов на 42 день



Рис. 3. Всхожесть образцов на 63 день

Количественные результаты морфометрических измерений, проведённых на 63-й день эксперимента, систематизированы в таблице.

Таблица

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	
		1	2	3	4	5	6	7	8
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 – полиамид-хлорид	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 – полиэтилен-терефталата	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		-

Контрольная группа (вермикулит). Всхожесть составила 55,6% (5 проростков из 9 повторностей: №1, №4, №5, №6, №9). Наблюдались признаки морфофизиологического дисбаланса и слабого развития корневой системы: длина корней варьировала от 1 до 7 см при средней величине $3,8 \pm 2,4$ см, тогда как надземная часть демонстрировала относительно стабильный рост (9–21 см). Диспропорция «корень/побег» свидетельствует о стрессовой аллокации ресурсов в условиях, вероятно, гипоксии, обусловленной высокой влагоёмкостью вермикулита. Фитосанитарный мониторинг выявил развитие микромицетов в 50%

повторностей (№2, №3, №7, №8), что коррелирует с непрорастанием семян в поражённых ячейках и подтверждает роль микробиологического фактора как лимитирующего в данном варианте.

Группа вспененного полистирола (EPS). Данный вариант продемонстрировал наивысшую всхожесть в эксперименте – 88,9% (8 из 9 проб: №1–№5, №7–№9). Морфометрические показатели характеризовались сбалансированным развитием: длина корней варьировала от 1,5 до 10 см (медиана 7 см), побегов – от 5 до 24 см (медиана 13 см). Максимальные значения (корень 10 см, побег 24 см) зафиксированы в пробе №3 без признаков морфологических аномалий. Фитосанитарное состояние субстрата было оптимальным: плесень визуализирована лишь в одной повторности (№6, 11,1%), где она, по-видимому, выступила фактором, ограничившим прорастание. Структура вспененного полимера, вероятно, способствовала улучшенной аэрации ризосферы, минимизируя риск гипоксии.

Группа полиэтилена низкой плотности (ПЭНП/LDPE). Всхожесть – 66,7% (6 из 9 проб: №1, №2, №3, №5, №6, №8). Группа показала наиболее выраженный стимулирующий эффект на ризогенез среди всех опытных вариантов: длина корней варьировала от 7 до 12 см (среднее $9,8 \pm 1,9$ см), причём значение 12 см (проба №1) стало абсолютным максимумом по всему эксперименту. Надземная часть развивалась в диапазоне 10–19 см. Микробиологическое загрязнение отмечено в 33,3% повторностей (№4, №7, №9), однако не оказало выраженного ингибирующего влияния на морфометрию выживших проростков. Полученные данные позволяют предположить, что физическая структура ПЭНП-частиц (гибкость, гидрофобность) может создавать благоприятные микрзоны для развития корневой системы [7].

Группа поливинилхлорида (ПВХ). Наименьшая всхожесть среди опытных групп – 44,4% (4 из 9 проб: №2, №3, №4, №6). Выявлена выраженная аллокационная стратегия: растения направляли ресурсы преимущественно в надземную биомассу (побеги 9–21 см, медиана 15,5 см), тогда как корневая система развивалась умеренно (3–10 см, медиана 6,5 см). Такое перераспределение может интерпретироваться как адаптивный ответ на химический или физический стресс, индуцированный присутствием ПВХ-частиц, содержащих пластификаторы и стабилизаторы. Фитосанитарное состояние субстрата было благоприятным: развитие плесени зафиксировано лишь в одной непроросшей повторности (№1), что указывает на отсутствие синергетического негативного эффекта со стороны микробиоты.

Группа полиэтилентерефталата (ПЭТ). Всхожесть высокая – 88,9% (8 из 9 проб), при этом полноценное развитие без выраженных морфологических аномалий отмечено в 7 повторностях. Характерной особенностью данного варианта стала максимальная индивидуальная

вариабельность морфометрических показателей: длина корней варьировала от 2 до 20 см (коэффициент вариации >60%), побегов – от 5 до 18 см. Такая гетерогенность может отражать высокую фенотипическую пластичность *P. sativum* в ответ на неоднородное распределение жёстких ПЭТ-частиц в субстрате, создающих локальные зоны механического сопротивления [3,7]. Фитосанитарное состояние субстрата оценивалось как хорошее, развитие микромицетов не зафиксировано.

Ключевые аналитические наблюдения на основе данных таблицы 1 и визуального мониторинга (рис. 1–3):

1. **Отсутствие универсального ингибирующего эффекта.** Ни один из исследованных полимеров не продемонстрировал статистически значимого подавления всхожести по сравнению с контролем. Более того, варианты с EPS и ПЭТ превысили контрольный показатель на 33,3 процентных пункта, что свидетельствует об отсутствии прямой фитотоксичности данных материалов в исследованных концентрациях [3;7].

2. **Полимер-специфичность морфофизиологических ответов.** Каждый тип полимера индуцировал уникальный паттерн развития [7,16]:

- EPS способствовал сбалансированному онтогенезу с минимальным микробиологическим стрессом;
- ПЭНП стимулировал ризогенез, что может быть связано с улучшением структурных характеристик субстрата;
- ПВХ вызывал аллокационный сдвиг в пользу надземной биомассы, интерпретируемый как стресс-ответ;
- ПЭТ характеризовался высокой индивидуальной вариабельностью, отражающей пластичность растения-индикатора.

3. **Роль физико-химических свойств субстрата.** Низкая всхожесть (55,6%) и высокая частота развития микромицетов (50% повторностей) в контрольной группе с вермикулитом свидетельствуют, что химическая инертность наполнителя не гарантирует оптимальных условий для онтогенеза. Избыточная влагоёмкость вермикулита, вероятно, способствовала гипоксии корневой зоны и пролиферации патогенной микрофлоры, что подчёркивает важность учёта физических параметров субстрата при интерпретации эффектов загрязнителей [7,10].

4. **Динамика развития во времени.** Визуальный анализ фотоматериалов (рис. 1–3) показывает, что различия между экспериментальными группами нарастали по мере продолжения эксперимента. Если на 21-й день различия были минимальны и касались преимущественно скорости прорастания, то к 63-му дню сформировались выраженные морфологические различия, особенно в развитии корневой системы.

Таким образом, результаты модельного эксперимента

демонстрируют, что влияние микрочастиц полимеров (фракция 1–6 мм) на ранний онтогенез *Pisum sativum* L. не является линейно токсичным, а определяется комплексом факторов: физической структурой и гидрофобностью полимера, его влиянием на аэрационно-водный режим субстрата, микробиологическим статусом ризосферы и фенотипической пластичностью растения-индикатора [3,7,16]. Полученные данные формируют основу для дальнейших исследований, направленных на изучение долгосрочных эффектов и механизмов взаимодействия микропластика с почвенными агроценозами.

Выводы

1. Отсутствие линейной фитотоксичности. Включение микрочастиц полимеров (фракция 1–6 мм, ~32% от массы субстрата) не оказало однозначного негативного влияния на всхожесть и морфометрию проростков [3,7]. Группы с пенопластом и ПЭТ продемонстрировали более высокую всхожесть (88,9%) по сравнению с контролем (вермикулит – 55,6%).

2. Полимер-специфичность растительных реакций. Каждый тип полимера формирует уникальный физиологический отклик [7,16]: EPS обеспечивает сбалансированное развитие и минимальный биотический стресс; LDPE стимулирует ризогенез; ПВХ вызывает сдвиг в сторону надземной биомассы при умеренном угнетении корней; ПЭТ характеризуется высокой индивидуальной вариабельностью ростовых показателей.

3. Детерминирующая роль физико-химических свойств субстрата. Низкая всхожесть и активное развитие микромицетов в контрольной группе свидетельствуют, что химическая инертность наполнителя не гарантирует оптимальных условий для онтогенеза. Избыточная влагоёмкость способствует гипоксии корневой зоны и пролиферации патогенной микрофлоры, что может маскировать или усиливать эффекты загрязнителей [7,10].

4. Методологическая и экологическая значимость. Разработанный протокол валиден для скрининговых исследований фитотоксичности полимерных загрязнителей [2,16]. Итоговый тезис исследования: влияние полимеров на ранний онтогенез растений является мультифакторным и определяется комплексом параметров: физико-химическими свойствами субстрата, микробиологическим статусом ризосферы и фенотипической пластичностью растения-индикатора. Оценка экологических рисков микропластика в агросфере требует дифференцированного, а не универсального подхода [3,7,10,16].

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.: Гидрометеоздат, 1989. 62 с.
2. Руководство по определению показателей качества почв и растений методом биотестирования. М.: Изд-во МГУ, 2015. 145 с.
3. Boots B. (2019). Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground / B. Boots, C.W. Russell, D.S. Green // *Environmental Science & Technology*. Vol. 53, № 19. P. 11496–11506.
4. Cox K.D. (2019). 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.
5. Crossman J. (2020). 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*. Vol. 724. Art. 138334.
6. De Falco F. (2018). 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*. Vol. 236. P. 916–925.
7. De Souza Machado A.A. (2019). 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*. Vol. 53, № 10. P. 6044–6052.
8. European Bioplastics. Fact Sheet: "Oxo-degradable" plastics. Berlin, 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.european-bioplastics.org>.
9. Gigault J. (2018). 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*. Vol. 235. P. 1030–1034.
10. Horton A.A. (2017). 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*. Vol. 586. P. 127–141.
11. Hüffer T. (2018). Sorption of organic compounds by aged polystyrene microplastic particles / T. Hüffer, T. Hofmann // *Environmental Pollution*. Vol. 236. P. 218–225.
12. Kole P.J. (2017). 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*. Vol. 14, № 10. Art. 1265.
13. Napper I.E. (2015). Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics / I.E. Napper, R.C. Thompson // *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 99, № 1–2. P. 178–185.
14. Piehl S. (2018). 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*. 8 Vol. 8. Art. 17950.
15. Prata J.C. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects / J.C. Prata // *Science of the Total Environment*. Vol. 702. Art. 134455.
16. Rillig M.C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? / M.C. Rillig // *Environmental Science & Technology*. Vol. 46. № 12. P. 6453–6454.

Об авторе:

СЕРГЕЕВ Антон Романович – аспирант 2 года обучения Института водных проблем РАН (117971, ул. Губкина, 3, Москва), преподаватель ФГБОУ ВО «Тверской государственной медицинской академии Минздрава РФ», гимназия (170100, Тверь, ул. Советская, д. 4), e-mail: arsergeev2000@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5963-4126, SPIN-код: 7848–7262.

The effect of polymer microparticles on the early ontogenesis of garden pea (*Pisum sativum L.*) under model experimental conditions

A.R. Sergeev

Federal State Budgetary Scientific Institution, Institute of Water Problems,
Russian Academy of Sciences, Moscow

A comparative assessment of the effects of polymer microparticles (expanded polystyrene, LDPE, PVC, and PET) on the early development of *Pisum sativum L.* was conducted in a 63-day model experiment. None of the studied polymers exerted a statistically significant inhibitory effect on seedling germination or morphometry; polymer-specificity of plant responses was revealed. The impact of microplastics was determined by a combination of factors: the physicochemical properties of the substrate, the microbiological status of the rhizosphere, and the phenotypic plasticity of the indicator plant.

Keywords: *microplastics, phytotoxicity, garden pea, model experiment, soil ecosystems, early plant ontogenesis, polymer pollution.*

Рукопись поступила в редакцию 18.05.2026

Рукопись принята к печати 20.05.2026