

Стимулирование биологической активности фракционированных по массе семян

Тамбовский государственный
технический университет, г. Тамбов,
Российская Федерация

В.Н. Долгунин, В.А. Пронин

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Виктор Николаевич Долгунин

E-mail: dolgulin-vn@yandex.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Долгунин, В.Н., & Пронин, В.А. (2025).
Стимулирование биологической
активности фракционированных по
массе семян. *Хранение и переработка
сельхозсырья*, 33(2), 76–91.
[https://doi.org/10.36107/
spfp.2025.2.641](https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.641)

ПОСТУПИЛА: 22.10.2024

ПРИНЯТА: 15.06.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии
конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при
поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (грант
РФФИ № 14-08-97531).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность
Сергееву Владимиру Валерьевичу
за помощь в подготовке статьи.



АННОТАЦИЯ

Введение: Согласно доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации важнейшей задачей является преодоление импортозависимости в обеспечении растениеводства семенами, что особенно важно для овощеводства, использующего более 80% импортных семян. Во многом, это обусловлено проблемами воспроизводства семян мелкосеменных культур со сложной архитектурой семенного растения, вследствие проблем прогнозирования условий получения семян с высокими агробиологическими свойствами.

Цель: Проверка гипотезы о наличии дифференцированного эффекта биостимулирования семян культуры со сложной архитектурой семенного растения в зависимости от свойств семян, фракционированных методом квазидиффузионной сепарации по массе, с целью рационализации процесса получения биологически ценного посевного материала.

Материалы и методы: Объектом исследования являлись семена моркови с высокой неоднородностью агробиологических свойств, обусловленной архитектурой семенного растения и длительным сроком хранения. Фракционирование семян по массе проведено с использованием эффекта квазидиффузионной сепарации в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате, при хаотических квазидиффузионных перемещениях семян в состоянии «газа твердых частиц». Столкновения частиц в потоке сопровождаются их квазидиффузионной сепарацией при встречном перемещении легких и тяжелых частиц вдоль градиента доли пустот. Для биостимулирования семян использованы инокулянты в виде концентрированной сублимированной смеси штаммов *Bacillus subtilis* в составе препарата «Гумаспорин». Оценка агробиологических свойств семян и эффекта их биостимулирования проведена с использованием стандартного метода исследования всхожести и энергии прорастания.

Результаты: С использованием эффекта квазидиффузионной сепарации семена моркови, предварительно сепарированные по объему семени на две части, разделены по массе на четыре равные по объему фракции с массой тысячи зерен: 1,6; 0,9; 0,8 и 0,7г. Оценка агробиологических свойств фракций семян обнаруживает низкие их значения в отсутствие значительной их корреляции с массой семян, что объясняется явлениями покоя и доразвития зародыша. Инокуляция способствует неоднородному повышению физиологической активности семян всех фракций. Высокий эффект биостимулирования достигается для семян с высокой плотностью, как крупных, так и мелких. Наиболее ярко эффект биостимулирования проявляется при инокуляции семян с наибольшей массой, способствуя повышению их всхожести и энергии прорастания на 30 процентных пунктов.

Выводы: Для повышения эффективности биостимулирования физиологической активности семян методом инокуляции необходимо учитывать особенности архитектуры семенного растения культуры. Многообразие морфометрических параметров семян, отражающих особенности архитектуры семенного растения, представляется возможным учесть путем фракционирования семян по массе с использованием эффекта квазидиффузионной сепарации в быстром гравитационном потоке. Наибольший эффект улучшения агробиологических свойств достигается при инокуляции семян с наибольшей плотностью и массой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

инокуляция фракционированных семян моркови; квазидиффузионная сепарация семян по массе; энергия прорастания; всхожесть семян

Stimulation of Biological Activity of Seeds Fractionated by Weight

Tambov State Technical University,
Tambov, Russian Federation

Viktor N. Dolgunin, Vasily A. Pronin

CORRESPONDENCE:

Viktor N. Dolgunin

E-mail: dolgunin-vn@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Dolgunin, V.N., & Pronin, V.A. (2025). Stimulation of biological activity of seeds fractionated by weight. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), 76–91. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.641>

RECEIVED: 22.10.2024

ACCEPTED: 15.06.2025

PUBLISHED: 31.06.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

This research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 14-08-97531).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Vladimir V. Sergeev for his assistance in preparing the manuscript.



ABSTRACT

Introduction: According to the Food Security Doctrine of the Russian Federation, the most important task is to overcome import dependence in providing crop production with seeds. This task is crucial for vegetable production, as it uses more than 80% of imported seeds. This is largely due to the problems of reproducing seeds of small-seeded crops with complex seed plant architectonics, as a result of the problems of predicting the conditions for obtaining seeds with high agrobiological properties.

Purpose: Testing the hypothesis of a differentiated effect of biostimulation of a crop seeds with a complex architectonics of the seed plant, depending on the properties of the seeds, fractionated by the method of quasi-diffusion separation by mass, in order to streamline the process of obtaining biologically valuable seed material.

Materials and Methods: The study analyzed carrot seeds with a high heterogeneity of agrobiological properties, which was caused by the architectonics of the seed plant and the long shelf life. The seed fractionation on mass was carried out using the effect of quasi-diffusion separation in a fast gravitational flow on a rough slope, with chaotic quasi-diffusion movements of the seeds in a state of «gas of solid particles.» Collisions between particles of different masses are accompanied by their quasi-diffusion separation as the light and heavy particles move in opposite directions along the gradient of the void fraction. The separation effect is enhanced by organizing multi-stage separation with counterflow of nonuniform particles. To activate the physiological activity of seeds, inoculants in the form of a concentrated freeze-dried mixture of *Bacillus subtilis* strains in the composition of the 'Humasporin' preparation are used. The assessment of the agrobiological properties of seeds and the effect of their biostimulation was carried out using the standard method of studying germination and energy of germination.

Results: Using the effect of quasi-diffusion separation, carrot seeds that have been pre-separated by seed volume into two parts have been divided by mass into four equal-volume fractions with a thousand-seed mass of 1.6, 0.9, 0.8, and 0.7 g. The assessment of the agrobiological properties of the seed fractions reveals low values and a lack of significant correlation with seed mass, which can be attributed to the phenomena of dormancy and embryo development. Inoculation contributes to a heterogeneous increase in the physiological activity of seeds from all fractions. A high stimulation effect is achieved for seeds with a high density, both large and small. The biostimulation effect is most pronounced when seeds with the highest mass are inoculated, increasing their germination rate and energy by 30 percentage points.

Conclusion: To increase the effectiveness of stimulating the physiological activity of seeds by the inoculation method, it is necessary to take into account the features of the architectonics of the seed plant of the crop. The diversity of the morphometric parameters of seeds, reflecting the features of the architectonics of the seed plant, can be taken into account by fractionation of seeds by weight using the effect of quasi-diffusion separation in a fast gravitational flow. The greatest effect of improving agrobiological properties is achieved by inoculation of seeds with the highest density and weight.

KEYWORDS

inoculation of fractionated carrot seeds; quasi-diffusion separation of seeds by weight; germination energy; seed germination

ВВЕДЕНИЕ

Качественный семенной материал является основополагающим фактором формирования высоких урожаев и устойчивости агропроизводственных систем. Эта истина, закреплённая как в агрономической практике, так и в народной мудрости («Каково семя, таково и племя»), приобретает особую актуальность в условиях реализации доктрины продовольственной безопасности России. Согласно оценкам профильных специалистов, уровень обеспеченности отечественного растениеводства семенами, соответствующими высоким посевным стандартам, по ряду культур остается недостаточным, что препятствует достижению стратегических целей аграрного сектора (Лукомец, 2021).

Особенно остро дефицит качественного семенного фонда проявляется в овощеводстве, где доля импортных семян превышает 80 % (Дербенский и Леунов, 2024). Проблема усугубляется как отсутствием масштабной селекционной базы, так и нехваткой эффективных технологий предпосевной подготовки семян. Развитие инфраструктуры семеноводства и внедрение научно обоснованных методов фракционирования и стимуляции семян рассматриваются как ключевые меры, способные изменить ситуацию. Концепция персонализированного подхода к подготовке семян с учётом их морфофизиологических характеристик и отклика на биостимуляцию приобретает особую значимость в современных условиях (Shrestha et al., 2021).

В этом контексте актуальность приобретает разработка технологий, способных одновременно учитывать неоднородность семенного материала и активировать его физиологический потенциал. Объектом пристального внимания становятся культуры со сложной архитектоникой семенного растения, в частности, морковь (*Daucus carota* L), семена которой характеризуются высокой вариативностью по размеру, форме, плотности и физиологической зрелости. Фракционирование семян по массе с применением инновационных методов, таких как квазидиффузионная сепарация (Долгунин и соавт., 2020, 2022), в сочетании с биологическим стимулированием с использованием бактериальных инокулянтов может стать перспективным направлением повышения эффективности посевного материала.

Целью настоящего исследования является экспериментальная оценка агробиологических свойств фракционированных по массе семян моркови до и после обработки биостимулятором «Гумаспорин» на основе *Bacillus subtilis*. Особое внимание уделяется выявлению зависимости физиологической активности от принадлежности семян к той или иной фракции, а также обоснованию условий, при которых инокуляция становится наиболее результативной.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Семеноводство и продовольственная безопасность

Обеспечение продовольственной безопасности невозможно без устойчивого и самодостаточного семеноводства. В настоящее время Россия испытывает значительную импортозависимость, особенно в сегменте мелкосеменных овощных культур. По данным Дербенского и Леунова (2024), до 80 % семян таких культур поступают из-за рубежа, что обусловлено как отставанием в селекционной работе, так и слабой технологической базой подготовки семян. Лукомец (2021) подчёркивает, что восстановление отечественного семеноводства требует системного подхода и государственного участия. В этом контексте создание сети региональных зон семеноводства и технологических кластеров является стратегической задачей (Леунов и соавт., 2024).

Физико-механические свойства семян как критерий качества

Масса, плотность, форма и зрелость зародыша являются ключевыми физическими индикаторами физиологического состояния семени. Наиболее универсальным из них признана масса тысячи семян (m_{1000}), поскольку она коррелирует с запасами питательных веществ и потенциальной всхожестью (Лукомец и Благородова, 2010; Drincha et al., 2022; Wu et al., 2021). Однако эффективность традиционных методов сепарации (пневматических и вибрационных) в выделении семян по массе ограничена ввиду отсутствия стабильной зависимости между геометрическими характеристиками и физиологическим потенциалом (Галкин и соавт., 2017; Дринча и соавт., 2020; Янченко и соавт., 2025).

Квазидиффузионная сепарация: физико-технологическое решение

В условиях высокой неоднородности морфометрических параметров традиционные подходы к калибровке оказываются недостаточно эффективными. Альтернативу предлагает метод квазидиффузионной сепарации, основанный на перераспределении частиц различной массы вдоль градиента доли твердой фазы в быстром сдвиговом гравитационном потоке (Долгунин и соавт., 2020; Kudi et al., 2021). В отличие от прямолинейной сортировки, этот метод позволяет одновременно учитывать и размер, и плотность, что особенно ценно при работе с семенами неправильной формы. Применение многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных компонентов смеси повышает точность выделения фракций (Долгунин и соавт., 2014).

Биостимуляция как метод активации физиологической активности

На фоне отказа от синтетических стимуляторов в растениеводстве всё большую популярность приобретают биостимуляторы на основе PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) — ризосферных бактерий, активирующих гормональные и метаболические процессы прорастания (Backer et al., 2018; Basu et al., 2021; Vocciante et al., 2022). В частности, штаммы *Bacillus subtilis* продемонстрировали высокую эффективность в качестве инокулянтов при обработке семян (White et al., 2021; Zadorozhnaya et al., 2022). Их использование особенно эффективно на ранних стадиях роста, а также в условиях стрессовых факторов (Romagn et al., 2020; Bano et al., 2022).

Комбинированные подходы: фракционирование и инокуляция

Несмотря на активное изучение как физических, так и биологических методов стимуляции, вопросы их совместного применения освещены недостаточно. В большинстве случаев инокуляция рассматривается независимо от морфологических характеристик семян (Vasconcelos et al., 2020; Rochlani et al., 2022). Между тем исследования показывают, что эффективность стимуляции может существенно варьироваться в зависимости от массы и плот-

ности семени, особенно у культур со сложной архитектоникой, таких как морковь (Бухаров и соавт., 2019; Куди и соавт., 2021). Таким образом, необходимо комплексное исследование, учитывающее влияние фракционирования на биологический отклик при инокуляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование представляет собой лабораторный факторный эксперимент на объекте, состояние которого определяется сочетанием уровней двух факторов: фактор 1 — масса семян (три уровня — группы семян с различной массой); фактор 2 — обработка/необработка фитостимулятором выделенных групп семян. Экспериментальное исследование выполнено как совокупность двух классических однофакторных экспериментов (экспериментальная схема — однофакторная ANOVA), проведенных независимо друг от друга и отличающихся фиксированным значением параметра обработка / необработка семян фитостимулятором (фактор 2). Использован однофакторный дисперсионный анализ с применением нулевой гипотезы и оценкой статистической значимости различия средних в сходственных группах независимых экспериментов.

Экспериментальные группы и сравнение

Для исследования выделены три группы — фракции семян, отличающихся по массе вследствие их различия по размеру и плотности. Для выделенных групп проведена оценка всхожести и энергии прорастания семян для альтернативных вариантов их использования (независимых экспериментов): с обработкой и без обработки фитостимулятором. В качестве основных в исследовании использованы следующие сравнения: (1) между фракциями в рамках каждого независимого эксперимента с обработкой и без обработки семян фитостимулятором; (2) между обработкой (инокулированными семенами) и контролем (необработанными семенами) каждой фракции; (3) между всеми фракциями с обработкой и без обработки семян фитостимулятором.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования выбраны семена моркови (*Daucus carota* L) сорта «Rote Riesen». Выбор объясняется высокой неоднородностью семян по комплексу физико-механических свойств (размеру, плотности, форме), обусловленной сложной архитектурой семенного растения моркови. Семена принадлежат одной партии и использованы для экспериментального исследования после четырех лет хранения в условиях сухого отапливаемого помещения.

Метод фракционирования семян

Предварительная сепарация семян по объему

С учетом сложной архитектуры семенного растения моркови, чрезвычайно широкого диапазона изменения морфометрических параметров (например, ширина варьируется от 0,5 до 3,0 мм) и сложной формы семян, принято решение о предварительной их сепарации по объему с использованием эффекта сегрегации в быстром сдвиговом гравитационном потоке на шероховатом скате (Долгунин и соавт., 2020, 2022). Для доминирования эффекта сегрегации семян по размеру на скате формируется поток с высокой концентрацией и однородным распределением твердой фазы, что достигается при относительно небольшом угле ската α , величину которого определяли из условия $(\sin\alpha/\sin\alpha_0 \approx 1,04...1,05)$, где α_0 — угол естественного откоса материала, и относительно большой толщине слоя, равной $(11...13)10^{-3}$ м. В таких условиях крупные семена, как концентраторы наибольших напряжений, всплывают к открытой поверхности потока, а мелкие погружаются к его основанию.

Основная сепарация семян по массе

Фракционирование семян по массе осуществлялось с использованием эффекта квазидиффузионной сепарации, основанного на переходе зернистой среды в состояние, аналогичное «газу твёрдых частиц» (Nagel, 2017). Такое состояние реализуется при высокой дилатансии, возникающей вследствие частых столкновений и хаотических перемещений частиц в быстром сдвиговом гравитационном потоке на шероховатом скате. При этом установлено, что относительные скорости перемещения частиц в таких потоках зависят

от обратного соотношения их масс, что приводит к квазидиффузионному перераспределению семян (Долгунин и соавт., 2020; 2022).

Физический механизм этого процесса связан с наличием в потоке градиентов доли пустот, формирующих структурную неоднородность среды. При хаотических флуктуациях частиц ударные импульсы распределяются по их поверхности неравномерно, в результате чего семена приобретают результирующее ускорение в направлении градиента. Семена с меньшей массой, обладая большей подвижностью, перемещаются в области с повышенной долей пустот, тогда как более тяжелые концентрируются в уплотненных зонах. Таким образом, направление и интенсивность сепарации определяются градиентом доли пустот, а скорость процесса пропорциональна разности произведений плотности и диаметра частиц, то есть их массы (Долгунин и соавт., 2020; 2022).

С целью интенсификации квазидиффузионной сепарации путем повышения градиентов доли пустот в большей части гравитационного потока, шероховатый скат располагали под относительно большим углом наклона α , величину которого определяли из условия $(\sin\alpha/\sin\alpha_0 \approx 1,09...1,1)$, где α_0 — угол естественного откоса материала, при относительно малой толщине слоя, равной $(10...11)10^{-3}$ м.

Для усиления эффектов сегрегации и квазидиффузионной сепарации использован принцип многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц (Долгунин и соавт., 2014) в аппарате с вращающимся барабаном. В результате последовательной реализации процессов предварительной и основной сепарации получены четыре равные по объему фракции семян, имеющие различную массу тысячи зерен (m_{1000} , г): 0,7; 0,8; 0,9 и 1,6 (Рисунок 1). При этом семена с массой 0,7 и 0,9 г получены путем сепарирования по массе фракции, состоящей из семян, имеющих небольшой объем, в то время как, фракции с массой семян 0,8 и 1,6 г выделены путем сепарации по массе семян, которые имеют большой объем.

Важным преимуществом предложенного метода сепарации семян является снижение их травмирования вследствие отсутствия жесткого механического воздействия.

Рисунок 1

Визуализация результатов последовательной сепарации семян моркови по объему и массе.

Figure 1

Visualization of the Results of Carrot Seeds Sequential Separation by Volume and Mass



Примечание. Сначала семена разделены по объему на крупную (a, b) и мелкую (c, d) фракции, затем — по массе на тяжелые (a, c) и легкие (b, d). Масса 1000 семян (m_{1000} , г): a — 1,6; b — 0,8; c — 0,9; d — 0,7.

Note. Seeds were first separated by volume into large (a, b) and small (c, d) fractions, followed by mass-based separation into heavy (a, c) and light (b, d) fractions. Thousand seed weight (m_{1000} , g): a — 1.6; b — 0.8; c — 0.9; d — 0.7.

Инокуляция семян

В качестве фитостимулятора семян использован препарат «Гумаспорин» (Humasporin), представляющий собой высококонцентрированную смесь сублимированных бактериальных штаммов семейства *Bacillus subtilis* (4×10^8 КОЕ/см³) с гуминовыми кислотами.

Фитостимулятор наносился на семена методом распыления.

Время выдержки инокулированных семян до начала испытаний: одни сутки.

Контролем служили необработанные семена.

Проращивание и физиологические показатели

Для проращивания семян использован стандартный метод по ГОСТ 12038–84.

Проращивание осуществлялось в чашках Петри между слоями влажной фильтровальной бумаги при температуре 23...25°C и относительной влажности воздуха 75...80%.

Количество повторных испытаний: 4 повтора $\times$ 100 семян, отобранных методом квартования.

Длительность проращивания: 14 суток.

Показатели испытаний образцов: всхожесть (%), энергия прорастания (%).

Статистический анализ показателей осуществлялся при уровне значимости 0.05 с использованием *t*-критерий Стьюдента и доверительных интервалов.

Анализ данных

Результаты параллельных измерений показателей проходили проверку на статистическую однородность путем построения доверительного интервала с использованием *t*-критерия Стьюдента при доверительной вероятности 95%. Статистически однородные результаты параллельных измерений числа проросших семян усреднялись и использовались в совокупности массива данных при изучении динамики процесса проращивания. Оценка статистической значимости различия средних в сходственных группах независимых экспериментов проводилась с применением *t*-test при уровне значимости 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем разделе представлены результаты сравнения общих морфометрических характеристик выделенных фракций семян, а также их всхожести и энергии прорастания до и после обработки фитостимулятором. При этом осуществляются сравнение агробиологических свойств, как между фракциями, так и дифференцированное сравнение эффекта стимулирования по фракциям в отдельности.

Морфометрические характеристики семян

Фракционный состав исходных семян исследован методом ситового анализа по ширине с использованием сит с круглыми отверстиями. Установлено, что семена моркови в таком варианте их фракционного анализа изменяются по размеру в диапазоне 0,5...3,0 мм при примерно 90 % содержании семян с шириной от 1 до 2 мм.

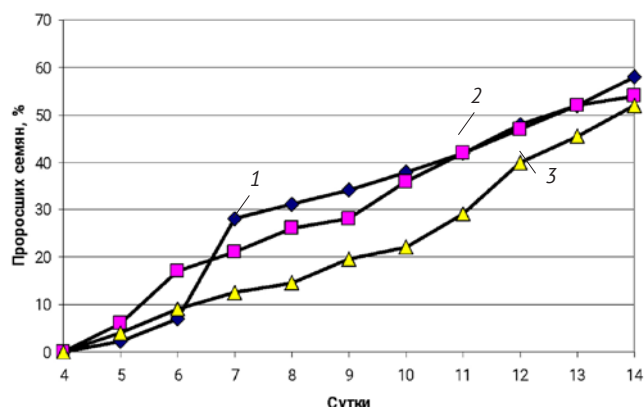
В результате двухступенчатой сепарации были выделены четыре равные по насыпному объему фракции, различающиеся по массе тысячи семян ($m_{1000} = 0,7; 0,8; 0,9$ и $1,6$ г). Каждая фракция характеризовалась также различиями по объёму и предполагаемой плотности, что формировало основу для последующего анализа их агробиологических свойств. Фракция мелких легких семян с массой тысячи зерен $0,7$ г содержала более 20 % масс. колотых семян и была исключена из анализа.

Рисунок 2

Зависимость числа проросших семян моркови без предпосевной обработки фитостимулятором от времени проращивания для фракций с различным объемом и массой тысячи семян (m_{1000})

Figure 2

Dependence of the Number of Sprouted Carrot Seeds without Pre-Sowing Treatment with a Phytostimulator on Germination Time for Fractions with Different Volumes and Thousand Seed Weights (m_{1000})



Примечание. а, b – крупная фракция (по объему); с, d – мелкая фракция; а, с – тяжелые (по массе); b, d – легкие; масса 1000 семян (m_{1000}): а – $1,6$ г; b – $0,8$ г; с – $0,9$ г; d – $0,7$ г

Note. a, b – large-volume fraction; c, d – small-volume fraction; a, c – heavy (by mass); b, d – light; thousand seed weight (m_{1000}): a – 1.6 g; b – 0.8 g; c – 0.9 g; d – 0.7 g

Всхожесть и энергия прорастания семян до предпосевной обработки

Исследование показало (Рисунок 2), что все фракции характеризовались низкими значениями всхожести (в пределах 60 %) и энергии прорастания (в пределах 30 %), что, вероятно, связано с длительным сроком хранения семян (Мусаев и соавт., 2018). Наибольшая скорость прорастания наблюдалась у фракции с наибольшей массой ($m_{1000} = 1,6$ г), в частности на 5–7 сутки, когда темп прорастания возрастал по экспоненциальному закону. Однако линейной зависимости между массой семян и показателями их физиологической активности выявлено не было.

Изменение агробиологических показателей после обработки фитостимулятором

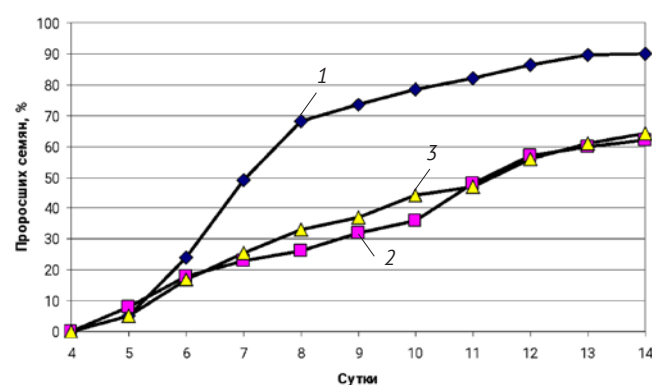
Предпосевная обработка всех фракций препаратом «Гумаспорин» привела к улучшению физиологиче-

Рисунок 3

Зависимость числа проросших семян моркови, прошедших предпосевную обработку фитостимулятором, от времени проращивания для фракций с различным объемом и массой тысячи семян (m_{1000})

Figure 3

Dependence of the Number of Sprouted Carrot Seeds that Have Undergone Pre-Sowing Treatment with a Phytostimulator on Germination Time for Fractions with Different Volumes and Thousand Seed Weights (m_{1000})



Примечание. 1 – семена с большим объемом и массой ($m_{1000} = 1,6$ г); 2 – семена с большим объемом и малой массой ($m_{1000} = 0,8$ г); 3 – семена с малым объемом и большой массой ($m_{1000} = 0,9$ г)

Note. 1 – seeds with large volume and weight ($m_{1000} = 1.6$ g); 2 – seeds with large volume and low weight ($m_{1000} = 0.8$ g); 3 – seeds with small volume and high weight ($m_{1000} = 0.9$ g)

ских показателей. Особенно выраженное повышение всхожести и энергии прорастания зафиксировано у фракции с наибольшей массой ($m_{1000} = 1,6$ г), для которой прирост достигал 30 процентных пунктов по сравнению с контрольной группой (Рисунок 3). У фракций с меньшей массой эффект обработки выражен в меньшей степени.

Дифференцированное сравнение эффекта стимуляции по фракциям

Тяжёлые крупные семена

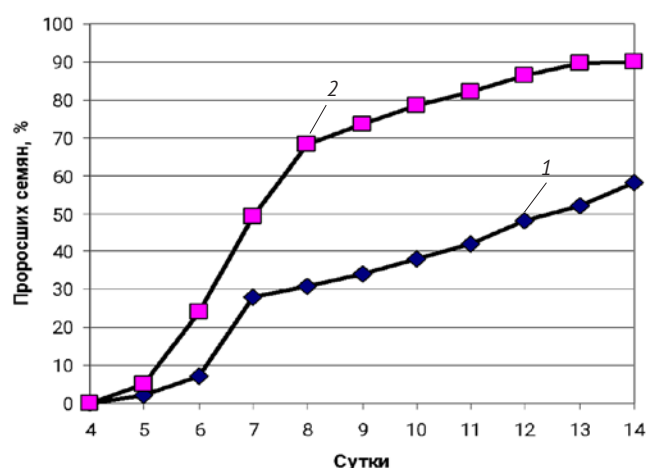
У фракции тяжёлых крупных семян ($m_{1000} = 1,6$ г) обработка фитостимулятором вызвала резкое ускорение прорастания (Рисунок 4), наблюдаемое уже на ранних этапах (с 3-х суток). Общая всхожесть возросла более чем на 30 процентных пунктов, что свидетельствует о высокой физиологической восприимчивости этой фракции к стимуляции.

Рисунок 4

К оценке эффекта биостимулирования физиологической активности фракции крупных тяжёлых семян моркови (Рисунок 1-а) с массой тысячи семян 1,6 г

Figure 4

Assessment of the Biostimulation Effect on the Physiological Activity of the Fraction of Large Heavy Carrot Seeds (Figure 1-a) with a Thousand Seed Weight of 1.6 g



Примечание. 1 — динамика прорастания семян без биостимулирования; 2 — динамика прорастания семян после обработки фитостимулятором

Note. 1 — dynamics of seed germination without biostimulation; 2 — dynamics of seed germination after treatment with a phytostimulator

Легкие крупные семена

Фракция крупных семян с низкой массой ($m_{1000} = 0,8$ г) показала менее выраженную реакцию на обработку: прирост всхожести составил не более 10%, а изменения энергии прорастания были незначительными (Рисунок 5).

Тяжёлые мелкие семена

Семена с малым объёмом, но высокой плотностью ($m_{1000} = 0,9$ г) отреагировали на фитостимуляцию заметным увеличением и скорости, и финальных показателей прорастания. Это позволяет предположить, что в условиях биостимуляции плотность семян может быть ключевым фактором, определяющим их физиологическую активность (Рисунок 6).

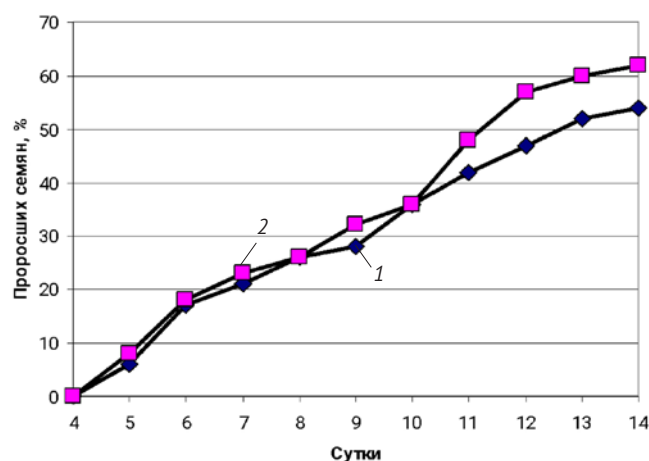
Таким образом, наибольший прирост показателей всхожести и энергии прорастания после предпосевной обработки был зафиксирован у фракций с высокой плотностью, как крупных, так и мелких. Это позволяет заключить, что физиологическая

Рисунок 5

К оценке эффекта биостимулирования физиологической активности фракции крупных лёгких семян моркови (Рисунок 1-б) с массой тысячи семян 0,8 г

Figure 5

Assessment of the Biostimulation Effect on the Physiological Activity of the Fraction of Large Heavy Carrot Seeds (Figure 1-b) with a Thousand Seed Weight of 0.8 g



Примечание. 1 — динамика прорастания семян без биостимулирования; 2 — динамика прорастания семян после обработки фитостимулятором

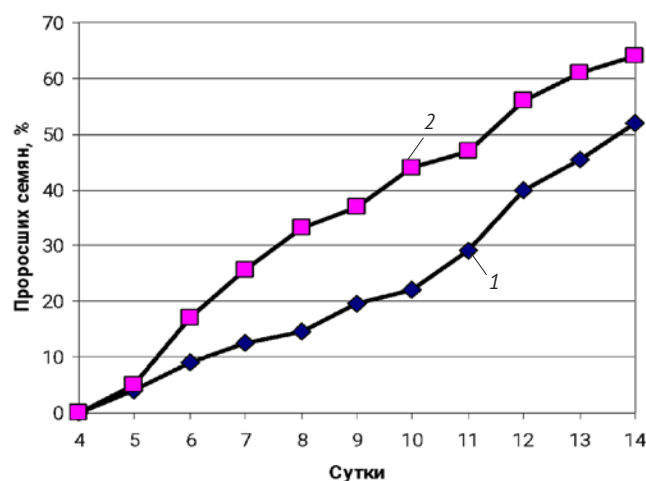
Note. 1 — dynamics of seed germination without biostimulation; 2 — dynamics of seed germination after treatment with a phytostimulator

Рисунок 6

К оценке эффекта биостимулирования физиологической активности фракции мелких тяжелых семян моркови (Рисунок 1-с) с массой тысячи семян 0,9 г

Figure 6

Assessment of the Biostimulation Effect on the Physiological Activity of the Fraction of Large Heavy Carrot Seeds (Figure 1-c) with a Thousand Seed Weight of 0.9 g



Примечание. 1 — динамика прорастания семян без биостимулирования; 2 — динамика прорастания семян после обработки фитостимулятором.

Note. 1 — dynamics of seed germination without biostimulation; 2 — dynamics of seed germination after treatment with a phytostimulator.

активность семян в условиях биостимуляции может быть более тесно связана с их плотностью, чем с геометрическим объемом или массой в отдельности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью настоящего исследования являлась экспериментальная оценка влияния фракционирования семян моркови по массе с использованием эффекта квазидиффузионной сепарации на их агробиологические свойства, а также проверка гипотезы о дифференцированном отклике фракций на биостимуляцию. Полученные данные подтвердили целесообразность выделения фракций с учетом массы как интегрального параметра, отражающего потенциальную физиологическую активность, однако выявили и ряд важных уточнений, касающихся роли плотности и зрелости зародыша.

Прежде всего, результаты подтвердили, что фракции семян с наибольшей массой и плотностью ($m_{1000} = 1,6$ г и 0,9 г) демонстрировали наибольший отклик на обработку биостимулятором. Это согласуется с положениями, изложенными в ряде работ, где масса семени рассматривается как важнейший фактор, определяющий его энергетическую обеспеченность и степень сформированности зародыша (Лукомец и Благородова, 2010; Drincha et al., 2022; Куди и соавт., 2021). Биостимулирующая обработка с использованием *Bacillus subtilis*, входящего в состав препарата «Гумаспорин», обеспечила статистически значимое повышение показателей всхожести и энергии прорастания именно в этих фракциях, что свидетельствует о высокой физиологической восприимчивости семян при условии достаточного внутреннего ресурса.

Отдельного внимания заслуживает различие между фракциями с визуально сходными геометрическими характеристиками, но различной плотностью. Например, семена с малым объемом и высокой плотностью ($m_{1000} = 0,9$ г) реагировали на инокуляцию значительно активнее, чем крупные, но лёгкие семена ($m_{1000} = 0,8$ г), что позволяет предположить, что плотность, а не объем, может служить более надёжным предиктором физиологического отклика. Такой результат подтверждает положения о неоднородности физиологической зрелости семян при сложной архитектонике семенного растения, описанной ранее в работах по зонтичным культурам (Бухаров и соавт., 2017; 2019). Подобная неоднородность может быть связана с пространственным распределением генеративных органов: у моркови наибольшей зрелостью и всхожестью обладают семена, сформировавшиеся на первичных зонтиках в их центральной части.

С позиции биотехнологической интерпретации, полученные данные подтверждают высокую эффективность инокуляции штаммами *Bacillus subtilis*, ранее описанную в исследованиях по различным видам культур (Majkowska-Gadomska et al., 2017; White et al., 2021; Zadorozhnaya et al., 2022). Однако в отличие от ряда работ, где инокуляция рассматривалась как универсальное средство стимуляции, данное исследование подчёркивает необходимость учёта морфофизиологических различий между фракциями. Отсутствие выраженного эффекта в группе лёгких крупных семян подтверждает предположение о потенциальной несформиро-

ванности или анатомической неполноценности зародыша в части семян данной фракции, несмотря на их геометрическую привлекательность для посева.

Необходимо также отметить, что исследование проводилось на семенах четырёхлетней выдержки. Как известно, длительное хранение сопровождается снижением физиологической активности (Мусаев и соавт., 2018), что могло обусловить низкие исходные значения энергии прорастания у всех фракций. Тем не менее, именно в таких условиях значение биостимуляции как компенсаторного механизма проявляется наиболее отчетливо. Интересно, что эффект инокуляции наблюдался уже на ранних этапах прорастания, начиная с третьих суток, что также подтверждает высокую биологическую активность используемого штамма.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют, что эффективность биостимуляции не может рассматриваться как универсальная функция от массы семян. Физиологический отклик детерминирован более сложным комплексом факторов, среди которых ключевую роль, по-видимому, играют плотность, зрелость зародыша и архитектура семенного растения. Эти выводы подчёркивают значимость подхода, основанного на сочетании технологий точного фракционирования (Долгунин и соавт., 2020, 2022) с адресной инокуляцией, как перспективной стратегии повышения качества посевного материала.

Ограничения исследования

Несмотря на полученные значимые результаты, настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации данных и планировании дальнейших исследований.

Во-первых, эксперимент был проведён на семенах одного сорта моркови (*Daucus carota* L. 'Rote Riesen'), что ограничивает возможность обобщения выводов на другие сорта и виды культур, включая растения с иной архитектурой генеративных органов. Как показано в предыдущих работах (Бухаров и соавт., 2017; 2019), морфофизиологическая неоднородность семенного материала существенно варьирует в зависимости от сортовых особенностей и экологических условий формирования семян.

Во-вторых, материалом исследования служили семена четырехлетнего хранения, что предполагает снижение их исходной физиологической активности (Мусаев и соавт., 2018). Это, с одной стороны, позволило продемонстрировать эффект биостимуляции в стрессовых условиях, но с другой — может ограничивать экстраполяцию результатов на более свежие семена с изначально высокой энергией прорастания.

В-третьих, в качестве биостимулятора использовался один препарат — «Гумаспорин» на основе *Bacillus subtilis*, без сравнения с альтернативными бактериальными штаммами, консорциумами микроорганизмов или иными типами фитостимуляторов. Между тем литература указывает на существенные различия в спектре и механизмах действия различных PGPR-препаратов (Basu et al., 2021; Javaid et al., 2023).

В-четвертых, фракционирование семян осуществлялось на экспериментальной установке с ручным контролем параметров, что затрудняет прямую репликацию методики в условиях крупномасштабного производства. Практическая реализация технологии квазидиффузионной сепарации в аграрной среде требует дальнейшей инженерной оптимизации и апробации на производственных площадках.

Наконец, исследование не включало в себя микроскопический анализ состояния зародыша и тканей, что могло бы позволить глубже интерпретировать различия в отклике фракций на инокуляцию. Корреляция морфометрических характеристик с анатомическими и биохимическими параметрами семян остается предметом будущих работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило обоснованно установить, что фракционирование семян моркови по массе с применением метода квазидиффузионной сепарации является эффективным инструментом выделения посевных фракций с высоким физиологическим потенциалом. Полученные данные подтверждают, что масса семян, как интегральная характеристика, лишь частично объясняет различия в агробиологических свойствах. Более точным предиктором физиологической активности в условиях биостимуляции может служить совокупность

таких факторов, как плотность, зрелость зародыша и положение семени в структуре генеративного органа растения.

Установлено, что предпосевная обработка инокулянтom на основе *Bacillus subtilis* оказывает выраженный стимулирующий эффект преимущественно на фракции с высокой плотностью, вне зависимости от их абсолютного объема. Это свидетельствует о том, что эффективность биостимуляции определяется не столько геометрическими параметрами, сколько внутренними структурными особенностями семени, включая степень физиологической зрелости. Фракции с низкой плотностью даже при крупном размере проявляют слабую реакцию на инокуляцию, что может быть связано с неполной анатомической сформированностью зародыша или недостаточными энергетическими резервами.

Таким образом, сочетание точного фракционирования по массе и биологической стимуляции семян представляет собой перспективное направление совершенствования технологий предпосевной подготовки. Результаты могут быть использованы для разработки адаптивных протоколов обработки семенного материала мелкосеменных культур, особенно в условиях длительного хранения или по-

ниженной исходной физиологической активности. В дальнейшем требуется расширение исследований с включением различных сортов и видов культур, а также сравнительная оценка действия различных типов инокулянтов, что позволит сформировать научно обоснованные рекомендации для практики селекции и семеноводства.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Долгунин Виктор Николаевич: разработка концепции; разработка методологии исследования; научное руководство; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Пронин Василий Александрович: проведение исследования; формальный анализ; написание черновика рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Viktor N. Dolgunin: conceptualization; methodology; supervision; writing — review & editing

Vasiliy A. Pronin: investigation; formal analysis; writing — original draft preparation.

ЛИТЕРАТУРА

- Бухаров, А.Ф., Балеев, Д.Н., Иванова, М.И., & Бухарова, А.Р. (2017). Изменчивость, корреляция и факторы формирования морфологических параметров семян укропа. *Овощи России*, (5), 37–41. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-37-41>
- Бухаров, А.Ф., Балеев, Д.Н., Кашнова, Е.В., Касаева, Г.В., Иванова, М.И., & Разин, О.А. (2019). Экологическая и сортовая изменчивость морфометрических параметров семян моркови. *Картофель и овощи*, (3), 37–40. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.26.44.009>
- Галкин, В.Д., Хандриков, В.А., & Хавыев, А.А. (2017). *Сепарация семян в вибропневмооживленном слое: технология, техника, использование*. Пермь: ИПЦ «ПрокростЪ».
- Дербенский, В.И., & Леунов, В.И. (2024). Анализ современного положения по обеспечению семенами овощных культур России. *Картофель и овощи*, (1), 17–20. <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.22.93.005>
- Долгунин, В.Н., Иванов, О.О., Уколов, А.А., & Куди, А.Н. (2014). Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках. *Теоретические основы химической технологии*, 48, 4, 303–413. <https://doi.org/10.7868/S0040357114040010>
- Долгунин, В.Н., Куди, А.Н., & Туев, М.А. (2020). Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов. *Успехи физических наук*, 63(6), 585–604. <http://dx.doi.org/10.3367/UFNe.2020.01.038729>

- Долгунин, В.Н., Куди, А.Н., & Тараканов, А.Г. (2022). Структурная неоднородность и эффекты сепарации по размеру и плотности при гравитационном течении зернистых материалов. *Инженерно-физический журнал*, 95(2), 492–503. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-022-02505>
- Дондоков, Ю. Ж., Дринча, В. М., Платонова, А. З., Аммосов, И.Н., & Филиппов, А.А. (2024). Микробная инокуляция семян для повышения безопасности и устойчивости растениеводства. *Вестник АГАТУ*, 2(14), 46–57.
- Дринча, В.М., & Филатов, А.С. (2020). Фракционирование семян при очистке от трудноотделимых примесей. *Пермский аграрный вестник*, 4(32), 4–12. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2020_32_4
- Задорожная, В.А., Подлесных, Н.В., & Соколенко, Г.Г. (2022). Оценка стимулирующего действия микробиологического биопрепарата на основе штамма *Bacillus subtilis* на посевные качества зерновых культур. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 15(1), 136–142. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_136
- Куди, А.Н., Федосов Н.А. Сергеев В.В., Тараканов, А.Г., Пронин, В.А. & Гончарова, А.Е. (2021). Мультифракционное сепарирование различных по форме и плотности полидисперсных частиц. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 27(2), 285–293. <http://dx.doi.org/10.17277/vestnik.2021.02.pp.285-293>
- Ламмас, М.Е., & Шитикова, А.В. (2021). Влияние биостимуляторов роста на энергию прорастания, всхожесть и интенсивность прорастания семян ярового ячменя. *Плодородие*, (5), 61–64. <http://dx.doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.15>
- Леунов, В.И., Дербенский, В.И., & Резвый, Г.И. (2024). Импортзамещение в семеноводстве овощных культур: проблемы и пути их решения. *Картофель и овощи*, (5), 12–16. <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.86.61.004>
- Лукомец, А.В. (2021). Семеноводство в обеспечении ресурсного рынка АПК и методы его защиты. *Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики*, (2), 134–141. <http://dx.doi.org/10.37984/2076-9288-2021-2-134-141>
- Лукомец, С.Г., & Благородова, Е.Н. (2010). Сортовые и посевные качества семян овощных культур. Краснодар: КубГАУ.
- Мусаев, Ф.Б., Солдатенко, А.В., Белецкий, С.Л., & Бухаров, А.Ф. (2018) Долговечность семян и структурные изменения при хранении, способы определения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 9–13.
- Янченко, А.В., Азопков, М.И., Голубович, В.С., & Янченко, Е.В. (2025). Доработка семян овощных культур на воздушном сепараторе. *Картофель и овощи*, (2), 56–60. <https://doi.org/10.25630/PAV.2025.77.16.005>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D.L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bano, A., Waqar, A., Khan, A., & Tariq H (2022) Phytostimulants in sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 801788. <http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2022.801788>.
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Chávez García, S. N., Rodríguez Herrera, R., Medrano Macías, J., Nery Flores, S., Silva Belmares, S. Y., & Flores Gallegos, A. C. (2024). Study of probiotics as biostimulants and biofortifiers in seed germination. *Fermentation*, 10(11), 538. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110538>
- Drincha, V. M., & Dondokov, Y. Z. (2022). Studying and developing fraction technologies for seed separation using pneumatic table separators. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 988(4), 042068–042068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/4/042068>
- Ferziger, J.H., & Kaper, H.G. (1972). *Mathematical theory of transport processes in gases*. Amsterdam: North-Holland Publ.

- Javaid, S., Mushtaq, S., Mumtaz, M.Z., Rasool, G., Tahir Naqqash, T., Maha Afzal, Uzma Mushtaq, U., Hayssam M. Ali, H.M., Akhtar, M. F-U-Z, Abbas, G., & Li, L. (2023). Mineral solubilizing rhizobacterial strains mediated biostimulation of rhodes grass seedlings. *Microorganisms*, 11, 2543. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102543>
- Kalymbetov, G.Y., Kedelbayev, B.Sh., Yelemanova, Zh.R., & Sapargaliyeva, B. (2023). Effects of different biostimulants on seed germination of sorghum plants. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 134–142 <https://doi.org/10.12911/22998993/157568>
- Majkowska-Gadomska, J., Francke, A., Dobrowolski, A., & Mikulewicz, E. (2017). The effect of selected biostimulants on seed germination of four plant species. *Acta Agrophysica*, 24(4), 591–599.
- Muhie, S.H., Memis, N., Ozdamar, C., Gokdas, Z., & Demir, I. (2021). Biostimulant priming for germination and seedling quality of carrot seeds under drought, salt and high temperature stress conditions. *International Journal of Agriculture Environment and Food Science*, 5(3), 352–359. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2021.3.1>
- Nagel, S.R. (2017). Experimental soft-matter science. *Reviews of Modern Physics*, 89, 025002 (2017) <http://dx.doi.org/10.1103/Revmodphys.89.025002>.
- Rochlani, A., Dalwani, A., Shaikh, N.B., Shaikh, N., Sharma, S., & Meenu Saraf, S. (2022). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers: Application in agricultural sustainability. *Acta Scientific Microbiology*, 5(4), 12–21. <https://doi.org/10.31080/ASMI.2022.05.1028>
- Romagn, I.S., Karsburg, E.J.P., & De Quadros Pint, S. (2020). Biostimulants in vegetable seeds submitted to germination and vigor tests. *Trends in Horticulture*, 3, 1. <http://dx.doi.org/10.24294/th.v3i1.1789>
- Shrestha, S., Dhungana, M., Sahani, S., & Bhattarai, B. (2021). Seed quality improvement to approach sustainable yield of field crops by various preparation techniques: Seed priming, treatment and inoculation. A review. *Plant Physiology and Soil Chemistry*, 1(1), 12–20. <https://doi.org/10.26480/ppsc.01.2021.12.20>
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., & Soleymani, A. (2024). The Roles of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 13, 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>
- Tamindzic, G., Miljaković, D., Vlajić, S. A., Milošević, D. N., Jovičić, D.D., Jakšić, S.P., & Ignjatov, M. (2024). The effect of biostimulants on parsnip seed germination and initial growth. *Seed Science and Technology*, 52(1), 79–84. <https://doi.org/10.15258/sst.2024.52.1.08>
- Vasconcelos, G.M.D., Mulinari, J., Oliveira Schmidt, V. K., Matosinhos, R.D., Oliveira, J.V., Oliveira, D., & José de Andrade, C. (2020). Biosurfactants as green biostimulants for seed germination and growth. *International Journal of Research Studies in Microbiology and Biotechnology*, 6(1), 1–13. <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9428.060100>
- Voccianti, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G., & Franchi, E. (2022). The role of Plant Growth — Promoting Rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied Sciences*, 12(3), Article 1231. <https://doi.org/10.3390/app12031231>
- White, J. F., Chang, X., Kingsley, K. L., Zhang, Q., Peerapol Chiaranunt, Micci, A., Velazquez, F., Elmore, M., Crane, S., Li, S., Lu, J., María Carmen Molina, González-Benítez, N., Beltrán-García, M. J., & Kowalski, K. P. (2021). Endophytic bacteria in grass crop growth promotion and biostimulation. *Grass Research*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.48130/gr-2021-0005>
- Wu, J., Qiu, S., Wang, M., Xu, C., Xing Wang Deng, & Tang, X. (2021). Construction of a weight-based seed sorting system for the third-generation hybrid rice. *Rice*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12284-021-00510-y>

REFERENCES

- Bukharov, A.F., Baleev, D.A., Ivanova, M.I., & Buharova, A.R. (2017). Variability, correlation and factors of formation of morphological parameters of dill seeds. *Vegetable Crops of Russia*, (5), 37–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-37-41>
- Bukharov, A.F., Baleev, D.N., Kashnova, E.V., Kasayeva, G.V., Ivanova, M.I., & Razin, O.A. (2019). Ecological and varietal variability of morphometric parameters of carrot seeds/ *Potatoes and Vegetables*, (3), 37–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.26.44.009>.
- Galkin, V.D., Khandrikov, V.A., & Khavyev, A.A. (2017). *Seed separation in a vibropneumoidized bed: Technology, technique, use*. Perm: CPI "Procrost". (In Russ.)
- Derbensky, V.I., & Leunov, V.I. (2024). Analysis of the current situation on the provision of seeds for vegetable crops in Russia. *Potato and Vegetables*, (1), 17–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.22.93.005>
- Dolgunin, V.N., Ivanov, O.O., Ukolov, A.A., & Kudi, A.N. (2014). Processing of granular materials in controlled segregated flows. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 48, 4, 404–413.
- Dolgunin, V.N., Kudi, A.N., & Tuev, M.A. (2020). Mechanisms and kinetics of gravity separation of granular materials. *Physics-Uspekhi*, 63(6), 545–561. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.3367/UfNe.2020.01.038729>
- Dolgunin, V.N., Kudi, A.N., & Tarakanov, A.G. (2022). Structural inhomogeneity and effects of separation by size and density in gravity flow of granular materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95(2), 464–494. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-022-02505>
- Dondokov, Yu. Z., Drincha, V. M., Platonova, A. Z., Ammosov, I. N., & Filippov, A. A. (2024). Microbial inoculation of seeds for increasing safety and sustainability of crop production. *Bulletin of UGATU*, 2(14), 46–57. (In Russ.)
- Drincha, V.M., & Filatov, A.S. (2020). Fractionation of seeds during purification from difficult-to-separate impurities. *Perm Agricultural Bulletin*, 4(32), 4–12. (In Russ.) https://doi.org/10.47737/2307-2873_2020_32_4
- Zadorozhnaya, V.A., Podlesnykh, N.V., & Sokolenko, G.G. (2022). Evaluation of the stimulating effect of a microbiological biological product based on the *Bacillus subtilis* strain on the sowing qualities of grain crops. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, 15, 1(72), 136–142. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_136 (In Russ.).
- Kudi, A.N., Fedosov, N.A., Sergeev, V.V., Tarakanov, A.G., Pronin, V.A., & Goncharova, A.E. (2021). Multifractional separation of polydisperse particles of various shapes and densities. *Trans. of Tambov State Technical University*, 27(2), 285–293. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.17277/vestnik.2021.02.pp.285-293>
- Lammas, M.E., & Shitikova, A.B. (2021). The effect of biostimulants of growth on germination energy, germination and germination intensity of spring barley seeds. *Fertility*, (5), 61–64. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.15>
- Leunov, V.I., Derbenskiy, V.I., & Rezvyi, G.I. (2024). Import substitution in vegetable seed production: Problems and ways to solve them. *Potato and Vegetables*, (5), 12–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.86.61.004>
- Lukomets, A.V. (2021). Seed production in ensuring the agro-industrial complex resource market and methods of its protection. *Fundamental and applied Research of the cooperative Sector of the Economy*, (2), 134–141. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.37984/2076-9288-2021-2-134-141>
- Lukomets, S.G., & Blagorodova, E.N. (2010). Varietal and sowing qualities of vegetable seeds. Krasnodar: KubGAU. (In Russ.).
- Musayev, F.B., Soldatenko, A.V., Beletskiy, S.L., & Bukharov, A.F. (2018). Durability of seeds and structural changes during storage, methods of determining. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 9–13. (In Russ.).
- Yanchenko, A.V., Azopkov, M.I., Golubovich, V.S., & Yanchenko, E.V. (2025). Refinement of vegetable seeds on an air separator. *Potato and vegetables*, (2), 56–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2025.77.16.005>

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D.L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bano, A., Waqar, A., Khan, A., & Tariq H (2022) Phytostimulants in sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 801788. <http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2022.801788>.
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Chávez García, S. N., Rodríguez Herrera, R., Medrano Macías, J., Nery Flores, S., Silva Belmares, S. Y., & Flores Gallegos, A. C. (2024). Study of probiotics as biostimulants and biofortifiers in seed germination. *Fermentation*, 10(11), 538. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110538>
- Drincha, V. M., & Dondokov, Y. Z. (2022). Studying and Developing Fraction Technologies for Seed Separation Using Pneumatic Table Separators. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 988(4), 042068–042068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/4/042068>
- Ferziger, J.H., & Kaper, H.G. (1972). *Mathematical theory of transport processes in gases*. Amsterdam: North-Holland Publ.
- Javid, S., Mushtaq, S., Mumtaz, M.Z. Rasool, G., Tahir Naqqash, T., Maha Afzal, Uzma Mushtaq, U., Hayssam M. Ali, H.M., Akhtar, M. F-U-Z, Abbas, G, & Li, L. (2023). Mineral solubilizing rhizobacterial strains mediated biostimulation of rhodes grass seedlings. *Microorganisms*, 11, 2543. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102543>
- Kalymbetov, G.Y., Kedelbayev, B.Sh., Yelemanova, Zh.R., & Sapargaliyeva, B. (2023). Effects of different biostimulants on seed germination of sorghum plants. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 134–142 <https://doi.org/10.12911/22998993/157568>
- Majkowska-Gadomska, J., Francke, A., Dobrowolski, A., & Mikulewicz, E. (2017). The effect of selected biostimulants on seed germination of four plant species. *Acta Agrophysica*, 24(4), 591–599.
- Muhie, S.H., Memis, N., Ozdamar, C., Gokdas, Z., & Demir, I. (2021). Biostimulant priming for germination and seedling quality of carrot seeds under drought, salt and high temperature stress conditions. *International Journal of Agriculture Environment and Food Science*, 5(3), 352–359. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2021.3.1>
- Nagel, S.R. (2017). Experimental soft-matter science. *Reviews of Modern Physics*, 89, 025002 (2017) <http://dx.doi.org/10.1103/Revmodphys.89.025002>.
- Rochlani, A., Dalwani, A., Shaikh, N.B., Shaikh, N., Sharma, S., & Meenu Saraf, S. (2022). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers: Application in agricultural sustainability. *Acta Scientific Microbiology*, 5(4), 12–21. <https://doi.org/10.31080/ASMI.2022.05.1028>
- Romagn, I.S., Karsburg, E.J.P., & De Quadros Pint, S. (2020). Biostimulants in vegetable seeds submitted to germination and vigor tests. *Trends in Horticulture*, 3, 1. <http://dx.doi.org/10.24294/th.v3i1.1789>
- Shrestha, S., Dhungana, M., Sahani, S., & Bhattarai., B. (2021). Seed quality improvement to approach sustainable yield of field crops by various preparation techniques: Seed priming, treatment and inoculation. A review. *Plant Physiology and Soil Chemistry*, 1(1), 12–20. <https://doi.org/10.26480/ppsc.01.2021.12.20>
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., & Soleymani, A. (2024). The Roles of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 13, 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>
- Tamindzic, G., Miljaković, D., Vlajić, S. A., Milošević, D. N., Jovičić, D.D., Jakšić, S.P., & Ignjatov, M. (2024). The effect of biostimulants on parsnip seed germination and initial growth. *Seed Science and Technology*, 52(1), 79–84. <https://doi.org/10.15258/sst.2024.52.1.08>
- Vasconcelos, G.M.D., Mulinari, J., Oliveira Schmidt, V. K., Matosinhos, R.D., Oliveira, J.V., Oliveira, D., & José de Andrade, C. (2020). Biosurfactants as green biostimulants for seed germination and growth. *International Journal of Research Studies in Microbiology and Biotechnology*, 6(1), 1–13. <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9428.060100>

- Voccianti, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G., & Franchi, E. (2022). The role of Plant Growth — Promoting Rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied Sciences*, 12(3), Article 1231. <https://doi.org/10.3390/app12031231>
- White, J. F., Chang, X., Kingsley, K. L., Zhang, Q., Peerapol Chiaranunt, Micci, A., Velazquez, F., Elmore, M., Crane, S., Li, S., Lu, J., María Carmen Molina, González-Benítez, N., Beltrán-García, M. J., & Kowalski, K. P. (2021). Endophytic bacteria in grass crop growth promotion and biostimulation. *Grass Research*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.48130/gr-2021-0005>
- Wu, J., Qiu, S., Wang, M., Xu, C., Xing Wang Deng, & Tang, X. (2021). Construction of a weight-based seed sorting system for the third-generation hybrid rice. *Rice*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12284-021-00510-y>

ОБ АВТОРАХ

Долгунин Виктор Николаевич, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106/5, помещение 2). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6227-5224>; Scopus ID: 6603255131; Researcher ID: L-6520-2018; SPIN-код: 3509-6579; dolgunin-vn@yandex.ru

Пронин Василий Александрович, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106/5, помещение 2). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1507-2969>; pronin-va65@mail.ru

AUTHOR INFORMATION

Viktor N. Dolgunin, Dr. Sc. (Engineering), Professor at the Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries, Tambov State Technical University (106/5 Sovetskaya str., room 2, Tambov, 392000). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6227-5224>; Scopus ID: 6603255131; Researcher ID: L-6520-2018; SPIN-код: 3509-6579; dolgunin-vn@yandex.ru

Vasily A. Pronin, Cand. Sc. (Engineering) Associate Professor at the Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries, Tambov State Technical University (106/5 Sovetskaya str., room 2, Tambov, 392000). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1507-2969>; pronin-va65@mail.ru