

ISSN: 2310-6255

Founder: Academic Publishing House *Researcher*

DOI: 10.13187/issn.2310-6255

Has been issued since 2013.



European Journal of Molecular Biotechnology

UDC 581.1:631.531.027.3:631.559:581.143

**Influence of Pulse Pressure on Seed Quality and Yield of Buckwheat
(*Fagopyrum esculentum* Moench.)**

¹ Elena Nefed'eva

² Tat'yana Veselova

³ Vladimir Veselovskii

⁴ Vladimir Lysak

¹ Volgograd State Technical University, Russian Federation
Professor of Industrial Ecology and Safety Department, D. Sc. (Biology)
400005, Volgograd, Lenin avenue, 28
E-mail: nefedieva@rambler.ru

² Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Russian Federation
Biological Faculty, Department of Biophysics
Senior Research Fellow of Plant Cell Biophysics Group, D. Sc. (Biology)
119991, Moscow, GSP-2, Vorob'evy gory

³ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Russian Federation
Biological Faculty, Department of Biophysics
Leading Research Fellow of Plant Cell Biophysics Group, D. Sc. (Biology)
119991, Moscow, GSP-2, Vorob'evy gory

⁴ Volgograd State Technical University, Russian Federation
Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Professor, D. Sc. (Engineering)
400005, Volgograd, Lenin avenue, 28
E-mail: lysak@vstu.ru

Abstract. A method of pre-sowing treatment of seeds by pulse pressure which is characterized by high intensity and accuracy of dosage has been proposed. Pulse pressures in the range of 11-29 MPa did not lead to acute lethality determined by phosphorescence at room temperature. So there was no elimination of unproductive individuals but pulse pressure stimulated physiological processes in seeds and plants, leading to increased yield. Changes of germination, growth, and distribution of substances as well as plant productivity were observed. Generalization and analysis of experimental results demonstrated zones in dose-dependent area, such as the zone of hormesis (11-17 MPa), transitional zone (20-26 MPa) and stress zone (29 MPa and more).

Keywords: *Fagopyrum esculentum* Moench.; plant stress; phosphorescence at room temperature; seed germination; growth.

Введение. В настоящее время активно разрабатываются новые подходы в биотехнологии и биоинженерии растений, направленные на наиболее полную реализацию потенциала продуктивности растений, для чего среди прочих методов используются стимуляторы роста физической природы [3; 16; 2]. Известны зависимости биологического эффекта от дозы воздействия, однако существует проблема разнонаправленного действия больших и малых доз, вызывающих соответственно неадаптивные (повреждение) или адаптивные реакции. В последнем случае развивается запрограммированная реакция, дающая возможность приспособиться к внешним условиям. Проблема стимулирующего

действия физических факторов до сих пор не решена окончательно, несмотря на многочисленные исследования [7; 12].

Концепция гормезиса – эффекта стимуляции от невысоких доз – возникла в медицинской физиологии и представляет интерес для понимания действия физических факторов. Внешний фактор в определенных пределах стимулирует компенсаторно-приспособительные механизмы организма и адаптацию его функций к новым условиям. На современном уровне знаний наиболее изученным является механизм радиационного гормезиса [7].

Эксперименты подтверждают существование двух метастабильных состояний, возникающих у растений под действием факторов разной интенсивности. Для объяснения используют гипотезу о наличии «триггерной» системы восстановления. Под биологическим триггером понимается возможность перехода клетки из одного состояния в другое [14], что соответствует нескольким устойчивым стационарным состояниям системы. Управляют триггером многие факторы, в том числе метаболические изменения.

Стабильными являются нормальное и стрессированное состояние, а переход осуществляется через нестабильное состояние. Поэтому увеличение вариабельности является критерием перехода клетки от нормальной жизнедеятельности к стрессу. Для возвращения триггера в исходное состояние после его включения в биологических системах недостаточно простого приведения величины управляющего параметра к исходному уровню. Существование триггерной системы выгодно для растения. Затруднение перехода из одного состояния в другое при пороговом воздействии предохраняет клетку от «поспешных» решений [14].

На растения действовали импульсным давлением (ИД) [13], возникающим при распространении ударной волны, которая создает объемное сжатие в течение 14–25 мксек. Давление влияет на поглощение воды [4], флоэмный транспорт [5], транспорт газов [1], формирование тканей [11], рост и развитие [8]. ИД усиливает рост и продуктивность растений [10].

Целью является исследование возможностей эпигенетического управления морфогенезом растений гречихи на основании выявленной зависимости физиологических особенностей и продуктивности растений от параметров ИД.

Материалы и методы. Семена гречихи (*Fagopyrum esculentum* Moench.) обрабатывали ИД 11, 23 и 29 МПа. При детонации взрывчатого вещества возникает ударная волна, которая передается через воду на семена и создает объемное сжатие в течение 14-25 мксек.

ИД на фронте ударной волны рассчитывали по формуле [13]:

$$P = 53,3 \cdot \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,13} \quad (1)$$

где P – давление, МПа; Q – масса заряда взрывчатого вещества, кг; R – расстояние от центра взрыва до поверхности семян, м.

Обработку семян проводили в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. На дно контейнера из нержавеющей стали (1) укладывали поролоновые кассеты (2) с сухими семенами (3), закрытыми сетчатым материалом. Контейнер (1) заполняли водой (4). В контейнере под водой закрепляли водостойкое взрывчатое вещество (5) с массой Q на расстоянии R от поверхности семян в соответствии с формулой (3). Толщина слоя воды над поверхностью семян составляла 7-13 см. Затем производили детонацию взрывчатого вещества при помощи электродетонатора (7). В каждой кассете находилось до 500 г семян, что являлось одной повторностью для всех нижеизложенных экспериментов.

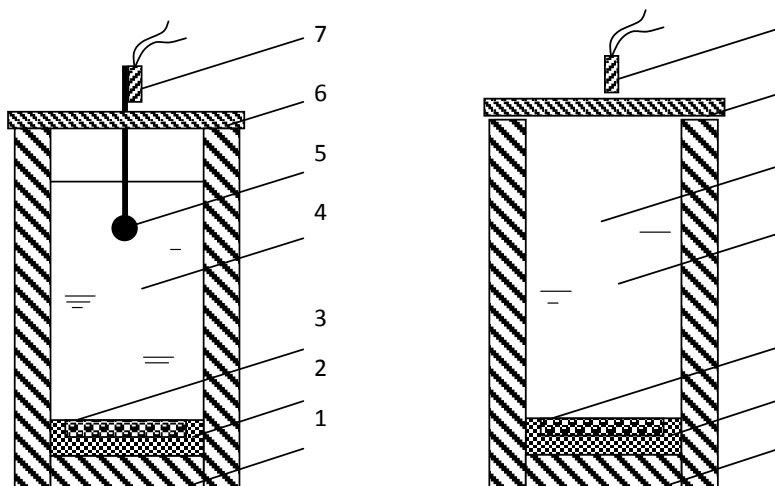


Рис. 1. Схема устройства для обработки семян ИД. Обозначения см. в тексте

После обработки семена высушивали в течение 24 час при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Контрольные семена замачивали в воде в течение времени, соответствовавшего продолжительности пребывания в воде семян при обработке ИД, и подсушивали. Способ обработки семян запатентован [13]. Достоинством метода является возможность точной дозировки воздействия, учитывая его уникально малую продолжительность.

Определение всхожести проводили согласно ГОСТ 12038-84 290 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Отбирали фракцию чистых выполненных семян. Четыре-пять проб по 100 семян в каждой проращивали в кювете на влажной фильтровальной бумаге, кювету закрывали стеклом. При учете всхожести отдельно подсчитывали нормально проросшие, а также набухшие, твердые (непроросшие) семена и ненормально проросшие – невсхожие семена. За результат анализа принимали среднее арифметическое результатов определения всхожести всех проанализированных проб. Условия проращивания семян гречихи по ГОСТ 12038-84 290: температура 25 °С, темнота, время проращивания для определения всхожести – 8 сут.

Проводили исследование флуоресценции при комнатной температуре (ФКТ) [17]. Для регистрации ФКТ семена предварительно выдерживали в эксикаторе над силикагелем в течение 24 час для удаления сорбированной из воздуха воды. С плодов гречихи снимали околоплодник и определяли ФКТ (рН 3, чувствительность 5) в отн. ед. В каждом варианте использовали 3 повторности по 50 семян. Исследовали различия в варьировании ФКТ семян под действием ИД. Значения ФКТ в пределах вариационных рядов распределяли по 8 классовым интервалам: 0...4, 11...20, 21...30, 31...40, 41...50, 51...60, 61...70, свыше 70. Количество вариантов, относящихся к каждому классовому интервалу, отражали на графиках. В пределах каждого варианта опыта сравнивали друг с другом отдельные повторности по критерию χ^2 . Число степеней свободы $n' = 7$, критические значения критерия χ^2 составляют 14,1 ($P = 0,05$); 18,5 ($P = 0,01$); 22,6 ($P = 0,002$).

Определяли сухую массу частей растений путем высушивания при температуре 130 °С до постоянной массы, взвешивали с точностью до 0,1 мг. Исследования проводили в четырех биологических повторностях.

Зная изменения сухой массы растений W , мг за период времени $(t_2 - t_1)$, сут, рассчитывали относительную скорость роста (ОСР), г·(г·сут)⁻¹:

$$ОСР = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Для математического описания роста использовали функцию Б. Гомпертца, позволяющую определить критические точки роста растений [9]. По эмпирическим данным (длина главного побега) строили график функции, которая представляет собой асимметричную S-образную кривую с растянутой верхней ветвью. Форма записи формулы имеет вид:

$$y = \frac{A}{10^{10^{a+bx}}}, \quad (3)$$

где A – окончательная длина побега, см; x – время, прошедшее с начала роста, сут; a и b – константы, определяющие форму кривой, y – высота растений в момент времени x .

После этого расчета определяли скорость роста как производную y' :

$$y' = \frac{b}{(\lg e)^2} \cdot \lg \frac{y}{A} \cdot y \quad (4)$$

На графиках, приведенных в работе, указаны эмпирические значения – средние арифметические и их стандартные ошибки, а также теоретические кривые роста и скорости роста, рассчитанные по формулам (3) и (4).

Исследовали структуру урожая растений. Проводили мелкоделяночные опыты на площади 10 м^2 в 4-кратной повторности. Семена сеяли, определив предварительно массу семян, которая должна быть высеяна на 1 м^2 с тем расчетом, чтобы на этой площади было заданное число всхожих семян. Поскольку ИД оказывает влияние на всхожесть семян, выравнивали посеы по количеству всхожих семян (200 растений на 1 м^2). После определения лабораторной и полевой всхожести семян рассчитывали норму высева во всех вариантах опыта. На 1 м^2 деланки размером $1 \text{ м} \times 10 \text{ м}$ длина ряда была 1 м , расстояние между соседними рядами – 15 см (рядовой способ посева), в длину располагалось 70 рядов. Если всхожесть семян в опыте не отличалась достоверно от контроля, норму высева не увеличивали.

Результаты и обсуждение. Результаты, полученные при многолетних исследованиях всхожести семян гречихи, позволили выявить закономерности, касающиеся реакции семян разного физиологического состояния на ИД (рис. 2).

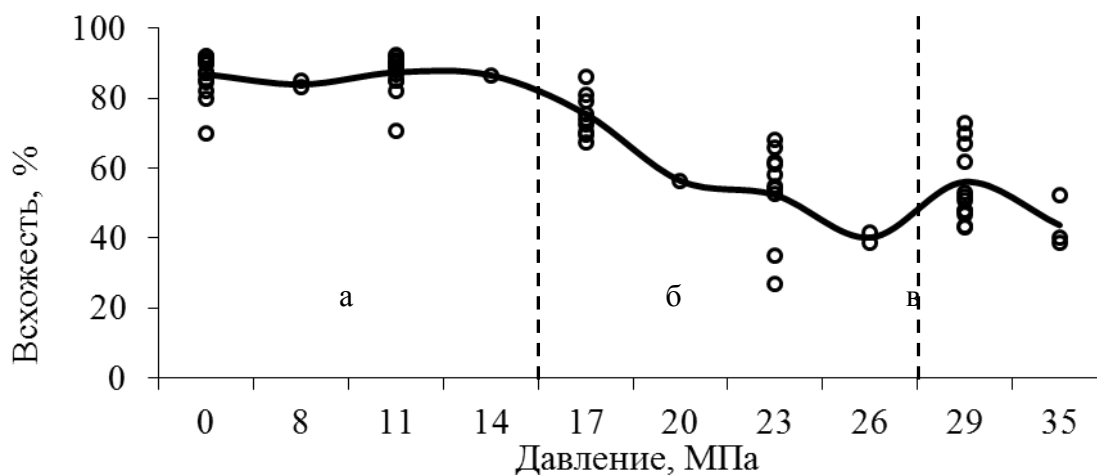


Рис. 2. Изменение всхожести семян гречихи под влиянием ИД. Обозначения см. в тексте

На рис. 2 показано, что у семян была обнаружена немонотонная зависимость: всхожесть не изменялась в интервале 0-14 МПа (рис. 2, а), затем закономерно убывала в диапазоне ИД 17-26 МПа (рис. 2, б), причем при 23 МПа были выявлены значительные колебания. При ИД 29-35 МПа (рис. 2, в) амплитуда колебаний снижалась, а всхожесть даже

несколько увеличивалась при 29 МПа. При экстремально высоких давлениях не удалось добиться 100 % гибели всех семян. Аналогичные данные характерны для действия ионизирующей радиации на семена [7].

Колебания всхожести гречихи при ИД 23 МПа указывало на их переход в нестабильное состояние, а дальнейшее снижение амплитуды этих колебаний свидетельствовало о переходе в качественно иное состояние – стресс [14].

Для выявления причин снижения всхожести было проведено исследование флуоресценции при комнатной температуре (ФКТ) семян гречихи.

Коэффициент корреляции между всхожестью и ФКТ составляет $-0,94 \div -0,98$ [17]. В партиях выделяют 3 фракции по мере возрастания ФКТ (I – семена, из которых вырастают нормальные проростки, II – семена, из которых вырастают проростки с морфологическими дефектами, III – преимущественно мертвые семена). Величина ФКТ обратно пропорциональна влажности семян (табл. 1).

Таблица 1

Соответствие ФКТ и влажности семян гречихи

Интервал по ФКТ	5-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	свыше 70
Влажность, %	7,50 ÷ 6,65	6,61 ÷ 6,56	6,55 ÷ 6,30	6,26 ÷ 6,18	6,15 ÷ 5,14	5,10 ÷ 4,50	4,65 ÷ 4,23	4,24 ÷ 4,17

Результаты исследования влияния ИД на ФКТ семян гречихи приведены на рис. 3. Распределение в контроле (рис. 3, кривая 1) имело вид кривой с двумя максимумами (5...10 и 31...40 отн. ед.), которым соответствовали семена I и II фракций.

Распределение при ИД 11 МПа (рис. 3, кривая 2) по χ^2 соответствовало контролю, однако в этом варианте несколько уменьшилось количество семян II фракции. Показано [17], что увеличить всхожесть можно только за счет живых семян, присутствующих в партии, но не мертвых. В частности, это могут быть семена, образующие дефектные проростки, не считающиеся всхожими по стандартам.

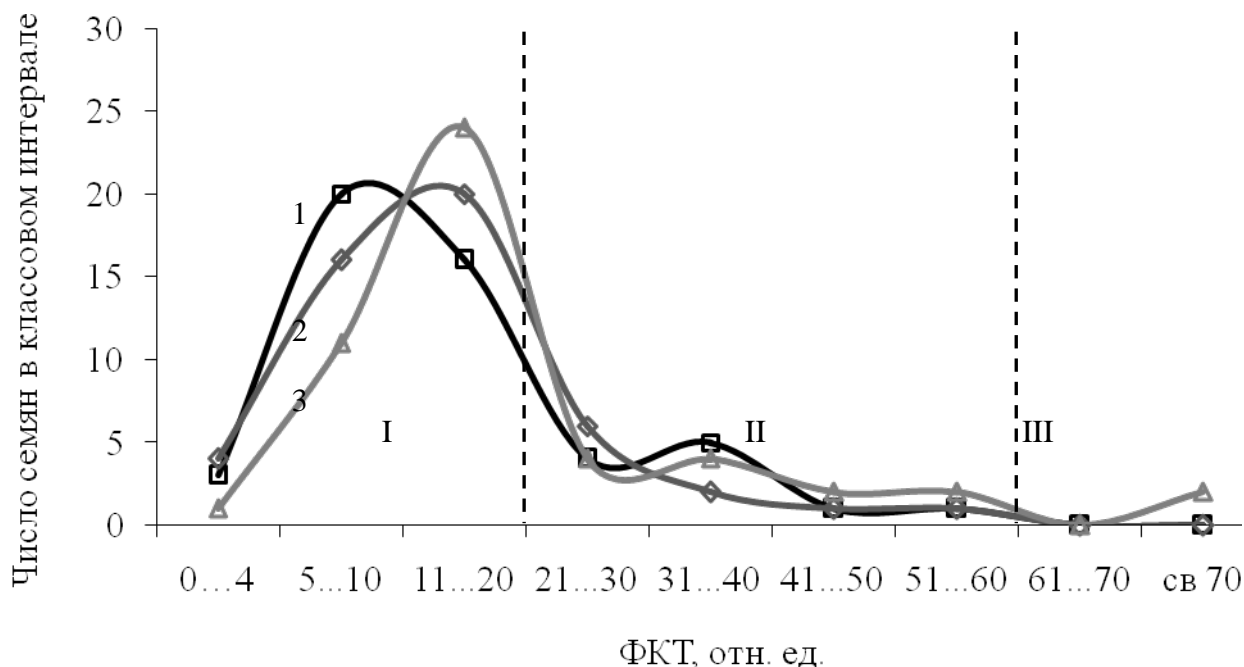


Рис. 3. Распределение семян гречихи по ФКТ: 1 – контроль, 2 – 11 МПа, 3 – 29 МПа

Известно, что под действием большинства стимуляторов в дозах, увеличивающих всхожесть, часть семян фракции II переходила во фракцию I. Эти семена были названы «улучшенными» [17]. При действии ИД 11 МПа, действительно, был возможен подобный переход. На него указывали уменьшение количества семян II фракции и смещение вправо пика, соответствующего I фракции (рис. 3, кривая 2). Данное явление подтверждается незначительным увеличением всхожести семян при действии ИД 11 МПа (рис. 2), особенно выраженное, по наблюдениям, в партиях со сниженной всхожестью.

Распределение ФКТ семян, обработанных ИД 29 МПа (рис. 3, кривая 3) по критерию χ^2 отличалось от контроля, поскольку обнаружено смещение главных пиков вправо. Количество мертвых семян (ФКТ свыше 61 отн. ед.) в этом варианте увеличилось незначительно, следовательно, снижение всхожести было связано с переходом семян из фракции I во фракцию II, из семян которых вырастали морфологически дефектные проростки, причем способность этих семян к прорастанию зависела от степени благоприятности условий среды.

При старении семена перемещаются из фракции I во фракцию II, и затем во фракцию III, утрачивая всхожесть [17]. При действии ИД семена не теряли способности к прорастанию согласно изменениям ФКТ, следовательно, ИД не приводило к острой летальности. Однако рост зародышей и формирование проростка протекали иначе, чем в контроле (рис. 4). В контроле ФКТ и габитус проростка соответствовали. При ИД 11 МПа из части семян II фракции сформировались нормальные проростки (рис. 4). При ИД 29 МПа обнаружено торможение роста проростков не только во II фракции, но даже в I фракции. Несоответствие ФКТ и вида проростков – следствие активации роста проростков, образовавшихся из семян II фракции при ИД 11 МПа и торможения роста проростков этой же фракции при ИД 29 МПа. Следовательно, наиболее чувствительными к воздействию являлись семена II фракции, причем их реакция зависела от дозы воздействия и соответствовала сценариям гормезиса (общей стимуляции) при ИД 11 МПа и стресса при ИД 29 МПа.



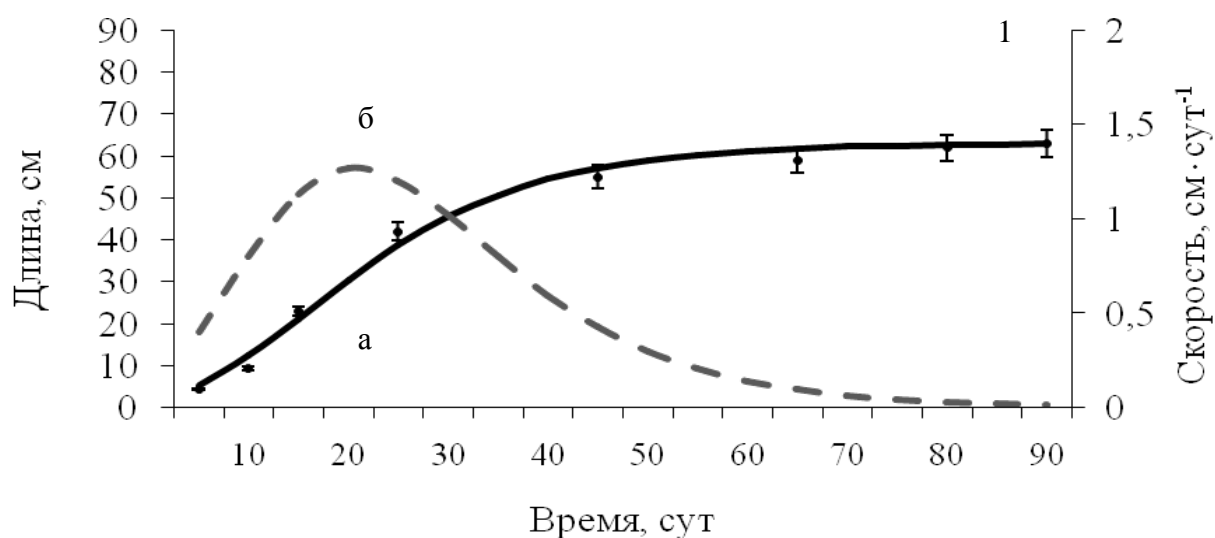
Рис. 4. Внешний вид проростков в соответствии с ФКТ семян: 1 – контроль, 2 – ИД 11 МПа, 3 – ИД 29 МПа

Изменение ФКТ и «улучшение» семян – явление преходящее, связанное с ускорением старения и накоплением повреждений [17]. Несоответствие ФКТ и внешнего вида проростков – следствие того, что при ИД развивается реакция, связанная с изменением ростовых процессов. Под действием фактора в значимых дозах организм переходит в кратковременное нестабильное состояние, после чего или возвращается на прежний уровень жизнедеятельности, или переходит в особое устойчивое состояние – стресс. Видимо, при ИД 11 МПа развитие событий происходило в целом по первому варианту, но для компенсации повреждений происходила активация роста, причем наибольшую чувствительность проявили семена II фракции, где эффект стимуляции выглядел особенно четко. При ИД 29 МПа у проростков происходил переход к стрессу, сопровождавшийся торможением роста,

который известен при различных воздействиях в стрессовых дозах [17;14]. Следовательно, изменение всхожести семян под влиянием ИД было связано с изменением состояния семян и ранними ростовыми процессами.

ИД оказало влияние на рост растений гречихи (рис. 5). Теоретические кривые 1 построены по эмпирическим данным, причем их соответствие находилось в пределах ошибки среднего арифметического значения (до 5 %). Теоретические кривые 2 рассчитаны как производные роста и характеризуют скорость роста растений.

На рис. 5 видно, что кривая роста была S-образной во всех вариантах опыта. Скорость роста изменялась как в ходе онтогенеза, так и в вариантах опыта. Наибольшая скорость роста обнаружена в фазу бутонизации, что характерно для гречихи. Отметим важную закономерность: высота растений и скорость роста при ИД 11 МПа (рис. 5, 2) были существенно выше, чем в контроле (рис. 5, 1), но были похожи по форме. При ИД 29 МПа (рис. 5, 3) скорость роста снижалась, но после достижения максимума затухала медленно, поэтому у кривой отсутствовало плато. Следовательно, действие ИД 11 МПа привело к активизации роста стебля и накоплению в нем ассимилятов – созданию резерва, пластические вещества которого по мере необходимости могут быть израсходованы. Напротив, при действии высокой дозы ИД питательные вещества экономно расходовались на рост стебля, но такой медленный рост продолжался в течение всего онтогенеза, за счет чего к завершению онтогенеза высота растений оказалась больше, чем в контроле.



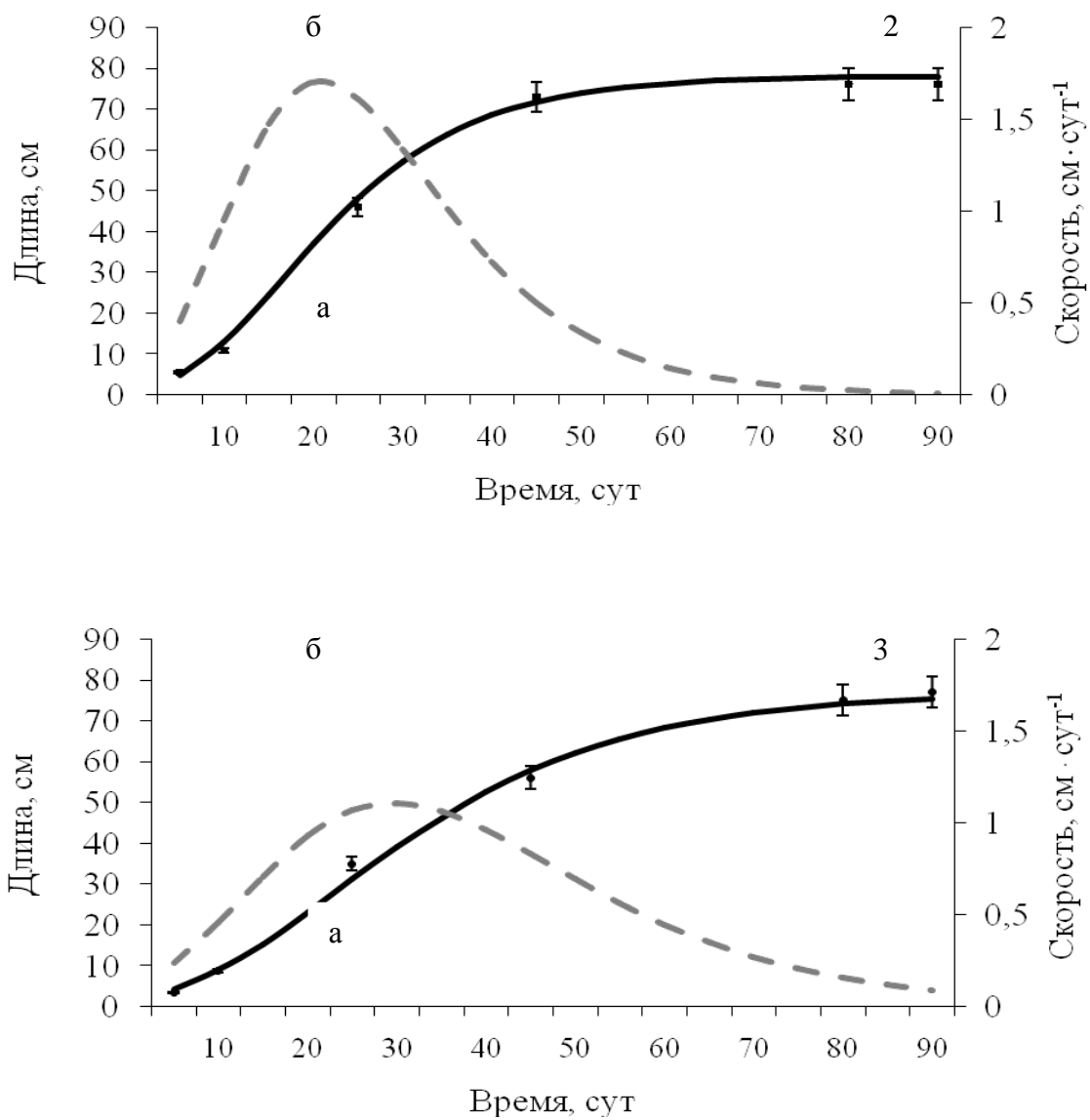


Рис. 5. Действие ИД на рост побега гречихи в длину: 1 – контроль, 2 – 11 МПа, 3 – 29 МПа; а – длина побега, б – скорость роста

Важным аспектом формирования урожая является накопление сухого вещества растением вследствие ассимиляции при фотосинтезе и диссимиляции при дыхании. В многочисленных работах показано влияние различных факторов на интенсивность дыхания и фотосинтеза.

Одним из ключевых признаков, отличающих виды растений с разным типом экологической стратегии, является ОСР [6]. Рудералы характеризуются высокими значениями ОСР. Известно, что мелкосемянные дикие формы имеют преимущество перед культурными по ОСР. Величина ОСР в оптимальных условиях позволяет прогнозировать будущий урожай растений.

Как видно из рис. 6, при ИД 11 МПа (рис. 6, 2) увеличение сухой массы растений гречихи происходило более интенсивно, чем в контроле (рис. 6, 1), а при ИД 29 МПа (рис. 6, 3) кривая была более пологой. Максимальная относительная скорость роста (ОСР) при ИД 11 МПа превышала контроль на 35 %, а при ИД 29 МПа – на 58 %, что могло быть одной из причин увеличения продуктивности растений.

Доля хозяйственного урожая в контроле составляла 20,35 %, при ИД 11 МПа – 20,36 %, при ИД 29 МПа – 43,16 %, следовательно, эти растения преимущественно перемещали ассимиляты в соцветия. ИД 11 МПа способствовало равномерному накоплению сухой массы, не изменялась нормальная динамика интегральных процессов – роста и распределения ассимилятов, но увеличилась их скорость, поэтому повышение урожайности было незначительным. Такую реакцию на воздействие называют гормезисом [16]. ИД 29 МПа привело к уменьшению общей сухой массы в течение онтогенеза, а увеличение массы соцветий и плодов было связано с медленным накоплением и перераспределением веществ в плоды. Исходя из изменений всхожести, эту зону можно назвать стрессовой.

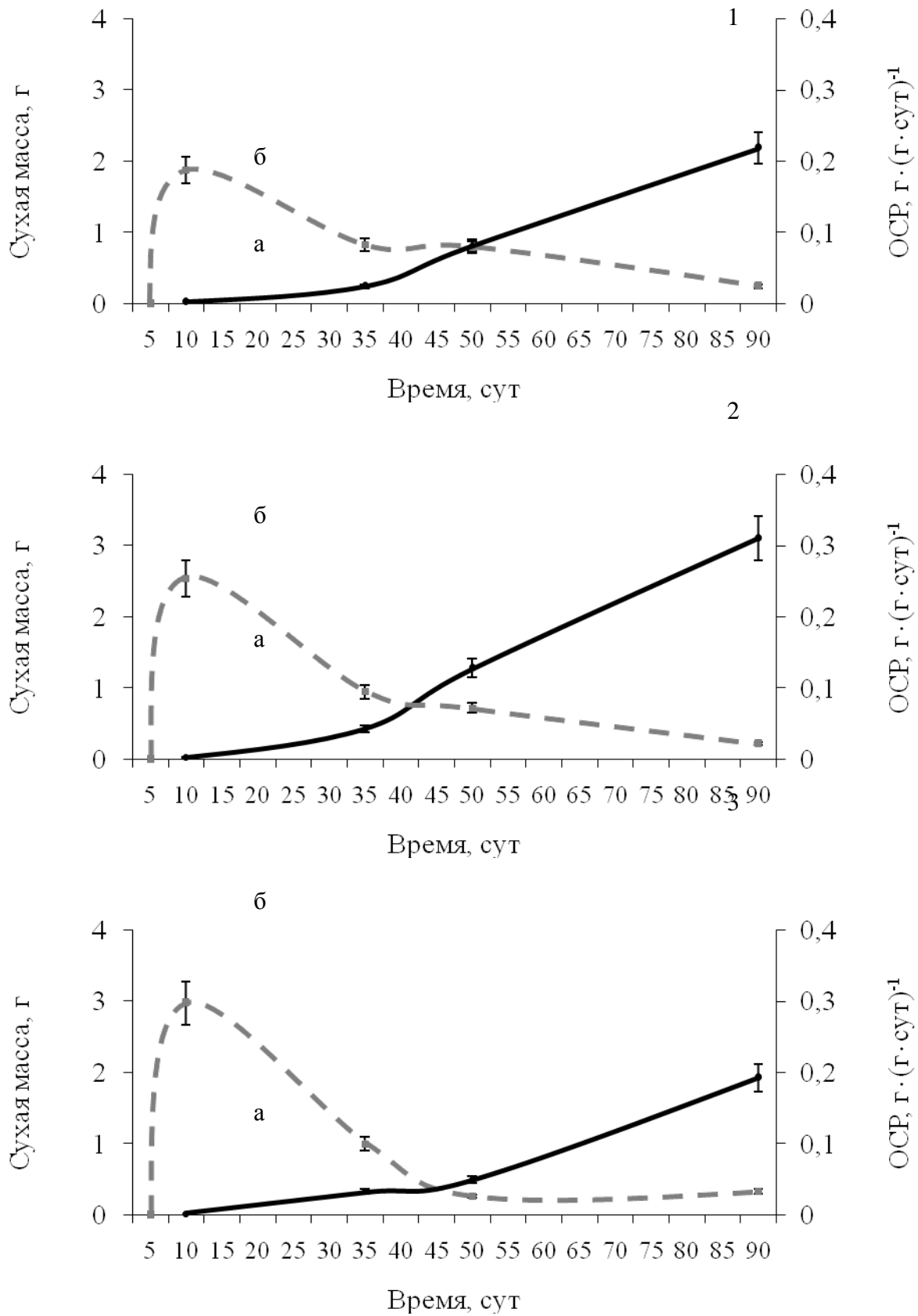


Рис. 6. Действие ИД на накопление сухой массы и относительную скорость роста (ОСР) гречихи: 1 – контроль; 2 – 11 МПа; 3 – 29 МПа; а – сухая масса; б – ОСР

В течение 15 лет выявлены особенности формирования урожая у растений после обработки семян ИД (рис. 7). Продуктивность растений на рис. 7 выражена как количество плодов в процентах от контроля, поскольку ее абсолютные значения различались в течение лет, что в большей степени зависело от погодных условий, качества семян и прочих факторов, а относительные значения, выраженные в процентах от контроля, лучше характеризовали влияние ИД.

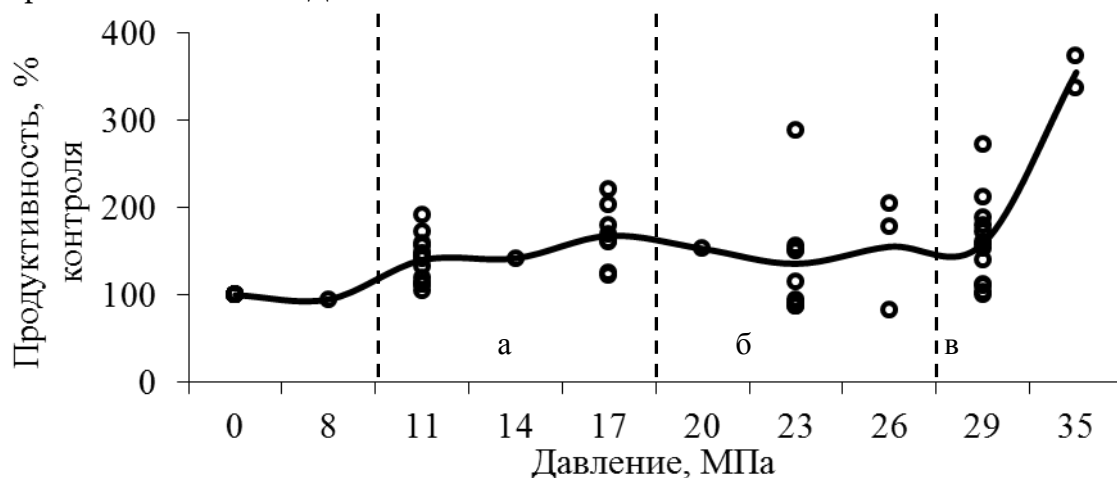


Рис. 7. Изменение продуктивности растений гречихи под влиянием ИД. Обозначения см. в тексте

Масса 1000 плодов изменялась незначительно, поэтому количество вызревших плодов на растении было пропорционально их массе. При ИД 8 МПа продуктивность не изменялась, при ИД 11–20 МПа увеличивалась на 15–60 %, при ИД 29–35 МПа возрастала в 1,5–3,5 раза. При ИД 23–26 МПа у продуктивности, как и всхожести, увеличивалась вариабельность, что характерно для перехода из одного стабильного состояния в другое [14].

При действии малых и больших ИД реализуются разные стратегии адаптации. У животных и растений существуют различные стратегии адаптации к стрессорам. Для растений общепринятой (хотя и не единственной) является концепция экологических «стратегий» Раменского-Грайма [15, 6] – одно из крупных обобщений экологии и физиологии растений. Различия между растениями определяются скоростью их роста, а рост – интегративный процесс, связанный с накоплением, перераспределением, расходом и запасанием питательных веществ. Изменения окружающей среды могут иметь периодический катастрофический характер (пожары, механические повреждения, поедание животными) – первый тип; или относительно постоянный неблагоприятный характер (водный дефицит, затенение и проч.) – второй тип.

Авторы [15] выделяют три группы растений, между которыми есть промежуточные формы или виды, проявляющие признаки нескольких групп:

1 – конкуренты (*Artemisia absinthium* L. – полынь горькая). Крупные растения с высокой скоростью роста. Образуют густой полог, формируют корневую систему с большой поверхностью. Обитают в местах со слабой вероятностью нарушений окружающей среды первого типа (вызывают частичное или полное уничтожение растений) и низкой интенсивностью факторов второго типа (снижают скорость роста, но не повреждают растения);

2 – рудералы (*Thlaspi arvense* L. – ярутка полевая). Быстрорастущие растения небольшого размера, быстрое проходящие фазы онтогенеза с образованием большой массы плодов и семян. Встречаются в местообитаниях с частыми катастрофами и относительно стабильными условиями между ними;

3 – стресс-толеранты (*Pyrola rotundifolia* L. – грушанка круглолистная). Медленно растущие растения небольшого размера. Обитают в неблагоприятных условиях с постоянно действующими факторами второго типа. Эти растения часто специализированы (засухоустойчивые, теневыносливые, галофиты) [15].

Во-первых, растения отдельных групп отличаются по интенсивности фотосинтеза (наибольшая – у конкурентов, промежуточная величина у рудералов, наименьшая – у стресс-толерантов).

Во-вторых, биологическая продуктивность определяется не только интенсивностью фотосинтеза, но и интенсивностью дыхания. Растения с высокой интенсивностью фотосинтеза (рудералы и конкуренты) тратят больше ассимилятов на дыхание, что закономерно, причем они отличаются также высокой скоростью роста. Стресс-толеранты осуществляют более экономный обмен веществ: мало ассимилируют, но и мало тратят и медленно растут. Зависимость скорости роста от интенсивности дыхания определяется потреблением энергии образовательными тканями – меристемами.

В третьих, растения по-разному распределяют ассимиляты. Наибольшую массу и поверхность листьев формируют конкуренты и рудералы, у них же большая часть пластических веществ остается в побеге, участвует в формировании стебля, а также генеративных органов, плодов и семян. Активность меристем у стресс-толерантов лимитируется невысокой интенсивностью дыхания, они, в частности, формируют мало цветков и плодов. У этих растений преобладает вегетативное размножение, более выгодное при постоянном действии неблагоприятных факторов, чем семенное размножение. У конкурентов основными потребителями являются меристемы, формирующие вегетативную массу, у рудералов – цветки и плоды, у стресс-толерантов – запасующие ткани и части, специализированные для вегетативного размножения.

Не вызывает сомнения эволюционно сформированная программа стресс-реакции, поэтому можно предположить, что у ряда растений при действии отдельных доз возмущающих факторов могут наблюдаться изменения, сходные с адаптациями, характерными для видов, приспособленных к определенным условиям обитания. Если предположить, что в реакции на целостном уровне можно выделить некоторые типы, то они должны иметь сходство с экологическими стратегиями адаптации растений.

Поскольку дозовые зависимости физиологических процессов растений от величины ИД немонотонны, и можно выделить переходную область, следует считать реакцию растений гречихи на ИД 11 МПа и 29 МПа принципиально различными.

Реакция растений на ИД 11 МПа заключается в усилении вегетативного роста (рис. 5, 6). Следовательно, растения гречихи, обработанные ИД 11 МПа, по комплексу признаков напоминают растения-конкуренты, быстро захватывающие пространство за счет развития вегетативных органов.

Напротив, при ИД 29 МПа вегетативный рост заторможен (рис. 5, 6), а для сохранения вида растения формируют большую массу семян (рис. 7), подобно стресс-толерантам.

Таким образом, видны две принципиально различные стратегии повышения продуктивности растений под действием ИД. Слабые дозы (11 МПа) нелетальны, приводят к общему усилению жизнедеятельности и повышению продуктивности на 14-30% в разные годы. Доля хозяйственного урожая, т.е. процент накопленного в плодах сухого вещества от массы общего сухого вещества, соответствует контролю. Высокие дозы (29 МПа) приводят к гибели до 50 % семян (рис. 2), а у выживших растений, наряду с изменением метаболизма, в частности усилением дыхания, изменяются отношения между донорами и акцепторами. Растение накапливает меньше сухого вещества, а в фазе цветения и плодоношения мобилизует резервы для формирования урожая. Величина хозяйственного урожая возрастает при ИД 29 МПа более чем в два раза по сравнению с контролем. Видимо, этот феномен призван обеспечить выживание не отдельного растения, а вида, поэтому увеличение продуктивности является более существенным – до нескольких раз.

Заключение. В работе теоретически обосновано и экспериментально доказано, что ИД в интервале 11–29 МПа не приводит к острой летальности, определяемой по уровню ФКТ, и элиминации малопродуктивных особей, но способствует стимулированию физиологических процессов в семенах и растениях, ведущих к увеличению урожая.

Путем анализа и обобщения экспериментальных данных обнаружены немонотонные изменения интегральных характеристик организменного уровня организации – всхожести, роста, накопления ассимилятов, а также продуктивности растений, позволившие выявить в

дозовой зависимости зону общей стимуляции – гормезиса (11–20 МПа), переходную (20–26 МПа) и стрессовую (29–35 МПа) зоны.

На основе детального анализа экспериментальных данных показано, что при гормезисе при действии ИД 11–20 МПа происходит увеличение продуктивности растений на 15–25 % в результате активизации физиологических процессов без изменения динамики. В стрессовом состоянии под действием ИД 29–35 МПа обнаружено нарушение нормальной динамики физиологических процессов растений, приводящее к торможению роста и изменению донорно-акцепторных отношений с преимущественным оттоком ассимилятов в плоды, приводящее к 2–3-кратному увеличению продуктивности. Доказано, что увеличение вариабельности признаков на целостном уровне при ИД 20–26 МПа соответствует переходному состоянию от гормезиса к стрессу.

Примечания:

1. Эльпинер И.Е. Биофизика ультразвука. М.: Наука, 1973. 384 с.
2. Савин В.Н. Действие ионизирующего излучения на целостный растительный организм. М.: Энергоиздат, 1981. 120 с.
3. Borodin I. Using the Effect of Photoinduced Variability of Optical Properties of the Chlorophyll-containing Tissues for Diagnosing the Functional State of Plants / I. Borodin, A. Budagovskii, O. Budagovskaya, I. Budagovskii, Y. Sudnik // *Russian Agricultural Sciences*. 2008. Vol. 34, № 5. P. 357.
4. Кузин А.М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. М.: Наука, 1995. 158 с.
5. Новицкий Ю.И. Реакция растений на магнитные поля // Реакция биологических систем на магнитные поля: под ред. Ю. А. Холодова М.: Наука, 1987. С. 117-130.
6. Патент RU № 2083073, 10.07.1997. Способ предпосевной обработки семян с.-х. культур. Э.С. Атрощенко [и др.]. Б.И. 1997. № 19.
7. Felix G. Sensing of Osmotic Pressure Changes in Tomato Cells / G. Felix, M. Regenass, T. Boller // *Plant Physiol*. 2000. Vol. 124, № 3. P. 1169–1180.
8. Fensom D.S. Tandem Moving Pressure Wave Mechanism for Phloem Translocation / D. S. Fensom, R. G. Tompson, C. D. Caldwell // *Fisiol.Rast. (Moscow)*. 1994. Vol. 41. P. 138-145 (Russ. J. Plant Physiol., Engl. transl.).
9. Afreen F. Pressure gradients along whole culms and leaf sheaths, and other aspects of humidity-induced gas transport in *Phragmites australis* / F. Afreen, S. M. A. Zobayed, J. Armstrong, W. Armstrong. *Journal of Experimental Botany*. 2007. 58. P. 1651-1662.
10. Nefedieva E.E. Influence of Impulse Pressure on Vascular Tissues and Productivity of Buckwheat Plants / E.E. Nefedieva, J.A. da Silva Teixeira // *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: advances and topical issues (1st Edition)* / Ed. J.A. Teixeira da Silva. England-Japan: Global Science Books, 2006. P. 44-51.
11. Kwiatkowska D. Flower primordium formation at the Arabidopsis shoot apex: quantitative analysis of surface geometry and growth // *Journal of Experimental Botany*. 2006. Vol. 57, No. 3. P. 571-580.
12. Нефедьева Е.Э. Давление как фактор регуляции у растений: моногр. / Е.Э. Нефедьева, В.И. Лысак. Волгоград: изд-во ВолгГТУ, 2009. 188 с.
13. Veselova T.V. Assessment of Individual Seed Vigor and Seed Lot Heterogeneity by Room Temperature Phosphorescence // *Seed Science and Technology*. 2002. Vol. 30, No. 1. P. 187-196.
14. Veselova T.V. Mathematical Modeling of Accelerated Seed Ageing / T.V. Veselova, V.A. Veselovskii, A.G. Kolupaev, E.A. Leonova, D.S. Chernavskii // *Biophysics*. 1999. Vol. 44, No. 3. P. 516-517.
15. Lane, D.A. 2001. HyperStat Online Textbook. Davidmlane.com. <http://davidmlane.com/hyperstat/index.html>.
16. P'yankov V.I. Assimilate Transport and Partitioning in Middle Ural Plants Differing in Their Ecological Strategies / P'yankov V.I., Yashkov M.Yu., Reshetova E.A., Gangardt A.A. // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2000. Vol. 47. № 1. P. 1-9.
17. Grime J.P. The C-S-R model of primary plant strategies-origins, implications and tests // Gottlieb LD, Jain S, eds. *Evolutionary plant biology*. London: Chapman & Hall, 1988. P.371-393.
18. Plant stress: a biophysical approach. / Veselovskii VA, Veselova TV, Chernavskii DS. // *FizioL Rasl. (Moscow)*. 1993. Vol. 40, P. 553-557 (Russ. J. Plant Physiol, Engl. Transl.).

References:

1. Afreen F. Pressure gradients along whole culms and leaf sheaths, and other aspects of humidity-induced gas transport in *Phragmites australis* / F. Afreen, S. M. A. Zobayed, J. Armstrong, W. Armstrong. *Journal of Experimental Botany*. 2007. 58. P. 1651-1662.
2. Borodin I., Budagovskii A., Budagovskaya O., Budagovskii I., Sudnik Y. Using the Effect of Photoinduced Variability of Optical Properties of the Chlorophyll-containing Tissues for Diagnosing the Functional State of Plants // *Russian Agricultural Sciences*. – 2008. – Vol. 34, No. 5. – P. 357.
3. El'piner I.E. *Biofizika ul'trazvuka*. M.: Nauka, 1973. 384 s.
4. Felix G. Sensing of Osmotic Pressure Changes in Tomato Cells / G. Felix, M. Regensass, T. Boller // *Plant Physiol*. 2000. Vol. 124, № 3. P. 1169–1180.
5. Fensom D.S. Tandem Moving Pressure Wave Mechanism for Phloem Translocation / D. S. Fensom, R. G. Tompson, C. D. Caldwell // *Fisiol.Rast. (Moscow)*. 1994. Vol. 41. P. 138-145 (Russ. J. Plant Physiol., Engl. transl.).
6. Grime J.P. The C-S-R model of primary plant strategies-origins, implications and tests // Gottlieb LD, Jain S, eds. *Evolutionary plant biology*. London: Chapman & Hall, 1988. P.371-393.
7. Kuzin A.M. *Idei radiatsionnogo gormezisa v atomnom veke*. M.: Nauka, 1995. 158 s.
8. Kwiatkowska D. Flower primordium formation at the *Arabidopsis* shoot apex: quantitative analysis of surface geometry and growth // *Journal of Experimental Botany*. 2006. Vol. 57, No. 3. P. 571-580.
9. Lane, D.A. 2001. *Hyper Stat Online Textbook*. Davidmlane.com. <http://davidmlane.com/hyperstat/index.html>.
10. Nefed'eva E.E. *Davlenie kak faktor regulatsii u rastenii: monogr.* / E.E. Nefed'eva, V.I. Lysak. Volgograd: izd-vo VolgGTU, 2009. 188 s.
11. Nefedieva, E.E. Influence of Impulse Pressure on Vascular Tissues and Productivity of Buckwheat Plants / E.E. Nefedieva, J.A. da Silva Teixeira // *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: advances and topical issues (1st Edition)* / Ed. J.A. Teixeira da Silva. England Japan: Global Science Books, 2006. P. 44-51.
12. Novitskii Yu.I. *Reaktsiya rastenii na magnitnye polya* // *Reaktsiya biologicheskikh sistem na magnitnye polya : pod red. Yu. A. Kholodova* M.: Nauka, 1987. S. 117-130.
13. Patent RU № 2083073, 10.07.1997. *Sposob predposevnoi obrabotki semyan s.-kh. kul'tur*. E.S. Atroshchenko [i dr.]. B.I. 1997. № 19.
14. *Plant stress: a biophysical approach.* / Veselovskii VA, Veselova TV, Chernavskii DS. // *FizioL Rasl. (Moscow)*. 1993. Vol. 40, P. 553-557 (Russ. J. Plant Physiol, Engl. Transl.).
15. P'yankov V.I. Assimilate Transport and Partitioning in Middle Ural Plants Differing in Their Ecological Strategies / P'yankov V.I., Yashkov M.Yu., Reshetova E.A., Gangardt A.A. // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2000. Vol. 47. № 1. P. 1-9.
16. Savin V.N. *Deistvie ioniziruyushchego izlucheniya na tselostnyi rastitel'nyi organizm*. M.: Energoizdat, 1981. 120 s.
17. Veselova T.V. Assessment of Individual Seed Vigor and Seed Lot Heterogeneity by Room Temperature Phosphorescence // *Seed Science and Technilogy*. 2002. Vol. 30, No. 1. P. 187-196.
18. Veselova T.V. *Mathematical Modeling of Accelerated Seed Ageing* / T.V. Veselova, V.A. Veselovskii, A.G. Kolupaev, E.A. Leonova, D.S. Chernavskii // *Biophysics*. 1999. Vol. 44, No. 3. P. 516-517.

УДК 581.1:631.531.027.3:631.559:581.143

Влияние импульсного давления на качество семян и урожай растений гречихи (*Fagopyrum esculentum Moench*)

¹ Елена Эдуардовна Нефедьева

² Татьяна Владимировна Веселова

³ Владимир Александрович Веселовский

⁴ Владимир Ильич Лысак

¹ Волгоградский государственный технический университет, Россия

доктор биологических наук, доцент

400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28

E-mail: nefedieva@rambler.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

Старший научный сотрудник кафедры биофизики, доктор биологических наук

119991, Москва, ГСП-2, Воробьевы горы.

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

Ведущий научный сотрудник кафедры биофизики, доктор биологических наук

119991, Москва, ГСП-2, Воробьевы горы.

⁴ Волгоградский государственный технический университет, Россия

Член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук

400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28.

E-mail: lysak@vstu.ru.

Аннотация. Предложен метод предпосевной обработки семян ИД, отличающийся высокой интенсивностью и точностью дозирования. ИД в интервале 3–35 МПа не приводит к острой летальности, определяемой по уровню флуоресценции при комнатной температуре, и элиминации малопродуктивных особей, но способствует стимулированию физиологических процессов в семенах и растениях, ведущих к увеличению урожая. Обнаружены немонотонные изменения всхожести, роста, распределения веществ и продуктивности растений, позволившие выявить в дозовой зависимости зону общей стимуляции – гормезиса (3–20 МПа), переходную (20–26 МПа) и стрессовую (29–35 МПа) зоны.

Ключевые слова: *Fagopyrum esculentum* Moench.; стресс у растений; флуоресценция при комнатной температуре; прорастание семян; рост.