

УДК 581.1:537.53

UDC 581.1:537.53

**ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИОЛОГО-
БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
PISUM SATIVUM L.****INFLUENCE OF SEVERAL TYPES
OF ELECTROMAGNETIC RADIATION
ON PHYSIOLOGICAL AND
BIOCHEMICAL PROCESSES OF
PISUM SATIVUM L.****Ж. Э. Мазец,***кандидат биологических наук, доцент
кафедры биологии и методики
преподавания биологии Белорусского
государственного педагогического
университета имени Максима Танка*ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8489-9793>;**А. А. Боровик,***магистрант Белорусского
государственного педагогического
университета имени Максима Танка;***Н. В. Пушкина,***старший научный сотрудник
физико-технической лаборатории
НИУ «Институт ядерных проблем»
БГУ, кандидат биологических наук***Zh. Mazets,***Associate Professor,
Department of Biology
and methods of biology teaching, the
Belarusian State Pedagogical University
named after Maxim Tank, PhD (biology)
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8489-9793>;***A. Borovik,***Master's student
of the Belarusian State Pedagogical
University named after Maksim Tank;***N. Pushkina,***senior researcher at the physical and
technical laboratory of the National
Research University "Institute of Nuclear
Problems" of BSU, PhD (biology)*

Поступила в редакцию 20.01.2025.

Received on 20.01.2025.

В статье обсуждаются особенности сортовой реакции гороха посевного, прошедшего предпосевную обработку электромагнитным излучением различного генеза и продолжительности. В ходе исследования наблюдается выраженная сортоспецифичность реакции *Pisum sativum* L. в ответ на воздействие определенного вида электромагнитного излучения, проявляющаяся в сдвигах посевных качеств семян, ростовых процессов на ранних этапах онтогенеза, перестройках в пуле фотосинтетических пигментов в листьях. Выявлено, что *Pisum sativum* L. сорта Бриз наиболее отзывчив на режим кратковременного воздействия высокоинтенсивным СВЧ-излучением в течение 2 минут, а для сорта Шуга Бон наиболее оптимально продолжительное электромагнитное излучение в течение 12 минут и часовое воздействие Wi-Fi.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, всхожесть, *Pisum sativum* L., фотосинтетические пигменты, ростовые процессы.

The features of the varietal response of peas that have undergone pre-sowing treatment with electromagnetic radiation of various genesis and duration were discussed in the article. A pronounced variety-specific reaction of *Pisum sativum* L. in response to the action of a certain type of electromagnetic radiation was observed during the study, manifested in shifts in the sowing qualities of seeds, growth processes in the early stages of ontogenesis and rearrangements in the pool of photosynthetic pigments in the leaves. It was revealed that *Pisum sativum* L. of Breeze variety is most responsive to short-term exposure to high-intensity microwave radiation for 2 minutes, but for the Shuga Bon variety, long-term electromagnetic radiation for 12 minutes and an hour-long exposure to Wi-Fi are most optimal.

Keywords: electromagnetic radiation, germination, *Pisum sativum* L., photosynthetic pigments, growth processes.

Введение. Электромагнитное излучение (ЭМИ) различной природы и интенсивности является неотъемлемой частью окружающей среды, оказывая влияние на все живые организмы. В последние десятилетия значительно возросло количество источников искусственных ЭМИ, поэтому появилась необходимость изуче-

ния их воздействия на физиолого-биохимические процессы сельскохозяйственных культур.

Растения постоянно адаптируются к меняющимся условиям окружающей среды. Способность к адаптации определяется генетическим потенциалом каждого вида и сорта и возможностью его реализации, определяя

устойчивость растений к неблагоприятным воздействиям и их продуктивность [1]. Слабые и кратковременные изменения внешних условий, как правило, не вызывают значимых нарушений физиологических функций, однако продолжительное воздействие сильных стрессоров может привести к серьезным повреждениям и гибели растений [2].

По этой причине для повышения стрессоустойчивости растений применяются различные технологии, например разнообразные физические факторы, среди которых много позитивных отзывов получило ЭМИ [3; 4]. Тем не менее опыт использования сверхвысоко-частотного (СВЧ) ЭМИ в сельском хозяйстве показал неоднозначные результаты, зависящие от параметров облучения (интенсивность, длительность) и видовых особенностей растений [5; 6]. Некоторые исследования свидетельствуют о стимулирующем эффекте ЭМИ на посевные качества, рост и продуктивность растений при определенных режимах обработки [7; 8].

Влияние ЭМИ на семена растений характеризуется дозозависимым эффектом. В зависимости от уровня облучения проявляется как стимуляция, так и угнетение роста и развития. Наиболее изученным видом воздействия является применение электромагнитного поля (ЭМП) СВЧ [9]. Тем не менее природа взаимодействия ЭМП СВЧ-диапазона с растительными организмами остается предметом дискуссий. Многие ученые полагают, что наблюдаемые эффекты обусловлены изменениями биофизических процессов на клеточном уровне. Предполагается, что ЭМП СВЧ-диапазона индуцирует возникновение ионных токов и электропотенциалов в клетках, изменяют проницаемость мембран и чувствительность рецепторов. Это, в свою очередь, приводит к трансформации электрических характеристик тканей, нарушению окислительно-восстановительных реакций и сдвигу кислотно-щелочного баланса (pH) [10; 11].

Результаты исследований демонстрируют, что колебания ионной силы и уровня pH в прилегающей к мембране области оказывают значительное влияние на метаболическую активность клетки, вплоть до активации процессов клеточного деления. Одним из возможных механизмов, лежащих в основе данного эффекта, является изменение положения периферических белков: их перемещение из связанного с мембраной со-

стояния в цитоплазматическое пространство и наоборот [12]. Одним из значимых факторов, определяющих влияние ЭМП СВЧ на растительные клетки, выступают показатели проницаемости биологических мембран. Доказано, что однократное воздействие СВЧ на растительные ткани вызывает изменения в проницаемости мембран фотосинтезирующих клеток для ряда ионов. В частности, облучение СВЧ (с длиной волны 6,5 мм и мощностью 0,5 мВт/см²) почти в два раза ускоряет увеличение концентрации O₂ в растворе и одновременно способствует ускорению поступления кислорода из воздуха в водный раствор за счет конвективного переноса [13]. Повышенная скорость транспорта кислорода и прочих веществ в тканях и клетках, предположительно, наряду с известными частотно-селективными (резонансными) явлениями, может быть одним из механизмов физиологического действия СВЧ-излучения [14]. Хотя в научной среде существуют различные подходы, но большинство исследователей сходятся во мнении, что электромагнитные возмущения в первую очередь влияют на физико-химические процессы, которые определяют ход биохимических реакций в организме [15–17].

ЭМП могут выступать в роли стрессового фактора, поэтому их воздействие на растения часто сопровождается липотропным эффектом в биомембранах, который реализуется через активацию липаз, фосфолипаз, перекисного окисления липидов (ПОЛ), обусловленную усилением генерации активных форм кислорода (АФК) и свободных радикалов [18]. Активность ферментов антиоксидантной защиты и скорость процессов ПОЛ тесно взаимосвязаны и зависят от интенсивности ЭМП, воздействующего на растения [19].

Сдвиги в проницаемости биологических мембран под влиянием ЭМИ СВЧ-диапазона сопровождаются изменением активности ферментов, встроенных в них. Кроме того, после такой обработки семян запускаются каскадные процессы, приводящие к увеличению проницаемости семенных оболочек, ускоряя, таким образом, поступление воды и кислорода к семенам [20]. Это обеспечивает более быстрое и полное обеспечение зародыша питательными веществами, ускоряет темп клеточного деления и активирует ростовые процессы в целом. У растений, полученных из обработанных семян, более интенсивно

развивается корневая система и ускоряется переход к фотосинтезу, что формирует надежный базис для дальнейшего роста и развития растений. Все эти изменения оказывают положительное влияние на рост и развитие растений [21].

Полученные данные дают основание предполагать наличие сложного взаимодействия ЭМИ СВЧ-диапазона с растительными объектами, опосредованного взаимодействием с определенными биологическими макромолекулами. Безусловно, для полного понимания механизмов биологической активности ЭМИ требуются дальнейшие углубленные исследования.

Овощные культуры, как высокочувствительные к условиям окружающей среды растения, произрастающие вблизи человеческого жилища и составляющие основу пищевого рациона, представляют особый интерес в контексте изучения воздействия ЭМИ. Понимание механизмов действия различных видов ЭМП на физиолого-биохимические процессы овощных культур является необходимым для оценки потенциальных рисков их воздействия на растительный организм, а также для разработки стратегий по оптимизации регуляции процессов роста и развития с помощью различного рода ЭМИ.

В связи с увеличением антропогенных источников ЭМИ необходимо дальнейшее выяснение их влияния на овощные культуры, что и определяет актуальность данного исследования.

Цель работы – оценить влияние отдельных видов электромагнитного воздействия на посевные качества семян и физиолого-биохимические процессы гороха посевного (*Pisum sativum* L.) на ранних этапах роста.

Задачи:

- изучить особенности влияния отдельных видов ЭМИ на посевные качества семян *Pisum sativum* L. двух сортов;
- исследовать влияние ряда видов электромагнитного воздействия на морфометрические параметры растений *Pisum sativum* L. на ранних этапах онтогенеза;
- выяснить особенности накопления фотосинтетических пигментов в листьях ювенильных растений *Pisum sativum* L. под влиянием ЭМИ.

Объекты и методы исследования.

В качестве объекта исследования был выбран горох посевной (*Pisum sativum*) двух сортов – Бриз и Шуга Бон (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид *Pisum sativum* L.

Горох посевной (лат. *Pisum sativum* L.) – широко культивируется как пищевое и кормовое растение [22], является ценным источником растительного белка, традиционно используется в кулинарии [23]. *Pisum sativum* отличается высокой концентрацией витаминов группы В, а также содержит витамины С, РР, Е, А, К, богат такими элементами, как: калий, магний, фосфор, железо, цинк, селен [23]. Позитивное воздействие данной культуры на пищеварительную систему обусловлено наличием пищевых волокон, выступающих в роли пробиотиков [24].

Для эксперимента были выбраны сорта *Pisum sativum* L. Бриз и Шуга Бон. Сорт гороха Бриз – это лущильный раннеспелый сорт с раскидистым строением побега, достигающим 75–80 см в высоту, дающий зеленые, морщинистые семена в бобах с пергаментным слоем. В отличие от него, Шуга Бон – это ранний сахарный сорт с более коротким стеблем, нежными, сочными, светло-зелеными бобами без пергаментного слоя, которые употребляются в пищу целиком, и содержит более крупные, сладкие горошины [25; 26].

Для выявления особенностей влияния ЭМП на ювенильные растения гороха посевного оценивалось предпосевное электромагнитное воздействие разного генеза. Семена гороха посевного были обработаны в Институте ядерных проблем БГУ на лабораторной установке для микроволновой обработки семян режимами (Р) электромагнитного воздействия: Р1 (2 мин) и Р2 (3 мин) – СВЧ обработка ЭМП СВЧ с микроволновым излучением с тепловым нагревом на частоте 2430 МГц, мощность 90 % из 800 Вт, Р3 (12 мин) – ЭМП СВЧ частотой 64–66 ГГц мощностью 10 мВт, Р4 – одночасовое Wi-Fi-излучение (семена выкладывались непосредственно на роутер TP-Link Archer AX53 частотным диапазоном 5 ГГц и мощностью

100 мВт). Контролем (К) служили необработанные семена.

Обработанные и контрольные семена гороха посевного выкладывались на предварительно увлажненную фильтровальную бумагу в чашки Петри и проращивались при комнатной температуре (18–21°C) в течение 12 дней в условиях естественного освещения и достаточного увлажнения.

Одним из основных параметров, изучаемых при предпосевном воздействии на семена, является энергия прорастания и всхожесть, которые определялись согласно ГОСТ [27].

Далее производилась оценка влияния ЭМИ на морфометрические параметры двенадцатидневных растений (длина и масса корней и проростков, площадь листьев) и накопление основных фотосинтетических пигментов в листьях гороха посевного на начальных этапах прорастания.

Площадь листовой поверхности определяли весовым методом по методике, описанной в работе [28].

Количественное содержание фотосинтетических пигментов в листьях проростков гороха на 12-й день прорастания определяли по методу, описанному в работе [29], экстракцию проводили 100 %-ным ацетоном. Оптическую плотность определяли на спектрофотометре «Specord-50» (Германия).

Результаты обрабатывались статистически с помощью пакета программ Microsoft Excel. Повторность опыта трехкратная.

Результаты и их обсуждение. При возделывании овощных культур особое внимание уделяется качеству посевного материала, так как именно оно во многом определяет продуктивность той или иной культуры. Так, установлено, что P2 повышал энергию прорастания семян сорта Бриз относительно контроля на 6,7 % (рисунок 2А), тогда как P3 и P4 снижали

исследуемый показатель у данного сорта на ту же величину. Выявлено снижение энергии прорастания под влиянием P1 и P2 у семян сорта Шуга Бон по сравнению с контролем на 7,7 % и 38,5 % соответственно, тогда как P3 и P4 повысили данный показатель на 7,7 %.

В ходе исследования было установлено, что первый и второй режимы достоверно не влияли на всхожесть семян *Pisum sativum* сорта Бриз, в то время как P3 и P4 снизили ее на 13,3 % и 6,7 % соответственно. Отмечено, что P1, P3 и P4 оказали стимулирующее воздействие на данный показатель у семян сорта Шуга Бон, увеличив всхожесть на 7,7 %, в то время как P2 настолько же снизил исследуемый показатель (рисунок 2Б). Таким образом, отмечена сортоспецифическая реакция на посевные качества семян гороха посевного на режимы электромагнитного воздействия.

Оценка морфометрических параметров ювенильных растений под влиянием ЭМП представляет заметный интерес для выявления характера влияния на ростовые процессы растений *Pisum sativum*. В результате исследования влияния различных видов ЭМИ на формирование подземных органов у гороха посевного сорта Бриз отмечена стимуляция роста корней и увеличение их длины во всех режимах – от 33,8 % (P1) до 42,7 % (P3) (рисунок 3А) и их массы от 9,6 % (P1) до 31,8 % (P2) (рисунок 4А). В то время как у сорта Шуга Бон выявлена разнонаправленная реакция на излучение: СВЧ-обработка с тепловым нагревом (P1 и P2) оказала негативное воздействие на рост корневой системы гороха посевного данного сорта, снижая длину корней на 55,8 % и 41,2 % соответственно (рисунок 3А) и на 36,4 % и 31,7 % их массу (рисунок 4А), а P3 и P4 увеличивали относительно контроля длину подземных органов на 7,5 % и 6,1 % (рисунок 3А) и их массу на 9 % и 32 % соответственно (рисунок 4А).

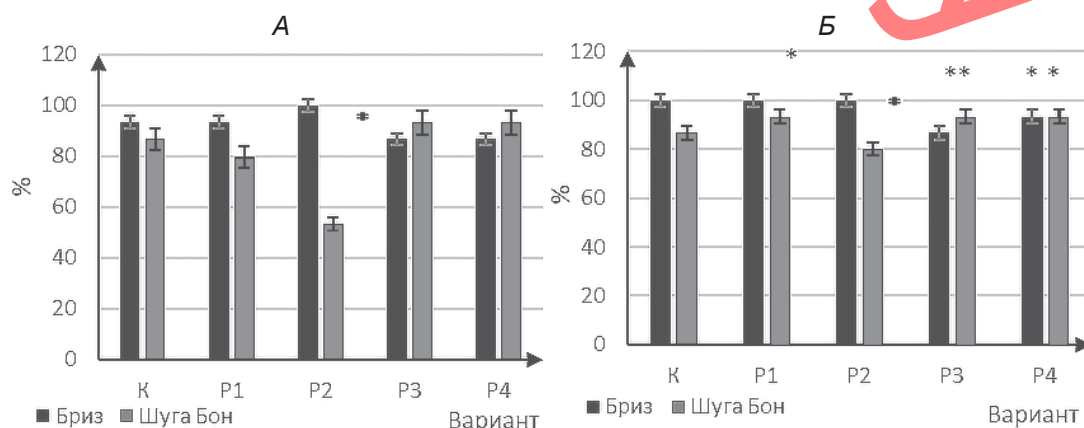


Рисунок 2 – Влияние ЭМИ на энергию прорастания (А) и всхожесть (Б) гороха посевного (* достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с контролем)

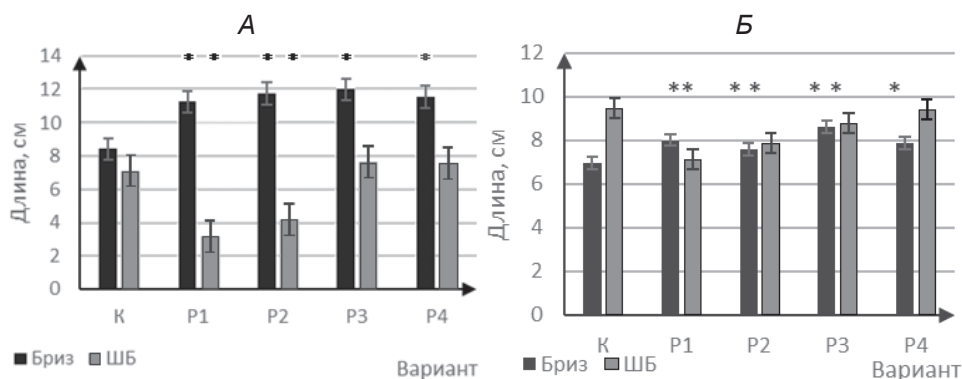


Рисунок 3 – Влияние ЭМИ на длину корня (А) и проростка (Б) гороха посевного на 12-й день прорастания (* достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с контролем)

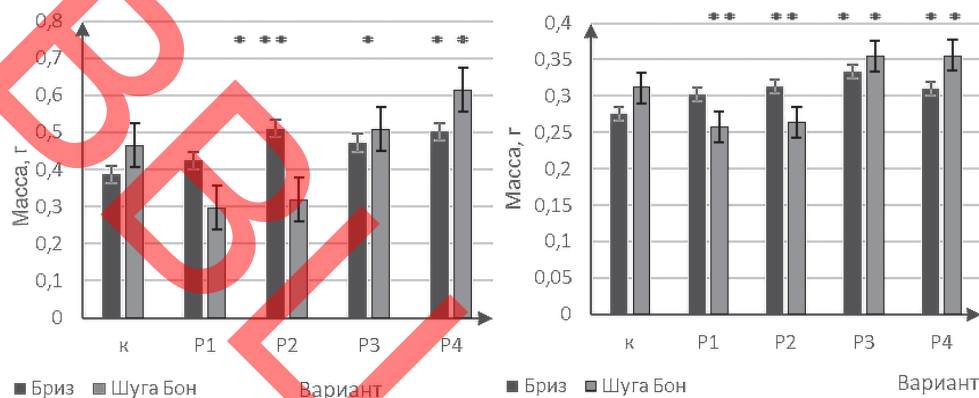


Рисунок 4 – Влияние ЭМИ на массу корней (А) и проростков (Б) 12-дневных растений гороха посевного (* достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с контролем)

При анализе реакции проростков гороха посевного установлен стимулирующий эффект от действия всех режимов ЭМИ на их длину на сорте Бриз от 8,9 % (P2) до 24,4 % (P3), тогда как на сорте Шуга Бон проявилось ингибирующее влияние – от 7,4 % (P4) до 17 % (P2) и 25,3 % (P1) (рисунок 3Б).

Установлена различная степень стимулирующего эффекта режимов ЭМИ на массу проростков гороха посевного сорта Бриз на 9,8 %, 13,7 %, 21,3 % и 12,9 % соответственно режимам P1, P2, P3 и P4 (рисунок 4Б). Характер влияния ЭМИ на массу проростков гороха посевного сорта Шуга Бон был аналогичен изменению их длины – снижение на 17,1% и 15,2 % в случае P1 и P2, и повышение показателя на 13,9 % и 14,4 % в вариантах P3 и P4.

В ходе опыта установлено, что все изучаемые виды ЭМИ снижали отношение длины проростка к длине корня относительно контроля у сорта Бриз (таблица 1) от 13,6 % и 13 % соответственно P1 и P3 до 21,8 % (P2), что указывает на преимущественно положительное влияние на рост корней гороха посевного данного сорта. У сорта Шуга Бон отмечена иная реакция на воздействие – P1 и P2 увеличили обсуждаемое соотношение на 70 % и 41 %

соответственно, в то время как P3 и P4 привели к увеличению роста корневой системы и снижению соотношения длины проростков к корням на 13,6 % и 6,2 % соответственно.

Таблица 1 – Влияние ЭМИ на соотношение длины надземных и подземных органов 12 растений *Pisum sativum* L.

Вариант	Отношение длина проростков/длина корней	
	сорт Бриз	сорт Шуга Бон
Контроль	0,83±0,04	1,33±0,06
P1	0,71±0,03	2,26±0,11
P2	0,64±0,02	1,88±0,09
P3	0,72±0,03	1,15±0,06
P4	0,68±0,03	1,25±0,06

Таким образом, режимы ЭМИ стимулировали формирование как надземных, так и подземных органов гороха посевного сорта Бриз, в то время как на сорте Шуга Бон отмечена разнонаправленная ингибирующе-стимулирующая реакция, определяемая интенсивностью и временем воздействия ЭМИ.

Важным морфометрическим параметром является площадь основного фотосинтетического органа – листа. Поэтому было оценено влия-

ние ЭМИ на данный показатель. Установлено, что у гороха посевного сорта Бриз все исследованные режимы ЭМИ привели к статистически значимому уменьшению площади листа от P1 (10,0 %) до 17,4 % (P4) (рисунок 5А). Отмечен также негативный эффект ЭМИ на данный показатель у сорта Шуга Бон, но меньшей амплитуды – от 3,8 % (P2) до 16,7 % (P3) (рисунок 5Б).

Изменения в характере ростовых процессов гороха посевного под влиянием различных видов ЭМИ во многом зависят от интенсивности реакций пластического обмена, где ведущее место занимают фотосинтетические процессы. В связи с этим актуальным было исследование, направленное на выявление влияния ЭМИ на накопление основных фотосинтетических пигментов в листьях ювенильных растений.

Хлорофилл *a* (хл *a*) – основной фотосинтетический пигмент, выполняющий функцию одновременно и пигмента-ловушки, и пигмента-сборщика. В результате исследования выявлено повышение уровня хлорофилла *a* в листьях гороха посевного сорта Бриз под влиянием всех

видов ЭМИ (рисунок 6А). Наиболее существенный стимулирующий эффект наблюдался при кратковременном воздействии СВЧ-излучения высокой мощности (P1) и составил 44 %, в то время как P2, P3 и P4 продемонстрировали менее значимый положительный результат – прирост относительно контроля составил 8,4 %, 9,7 % и 11,3 % соответственно. Результаты опыта демонстрируют выраженную сортоспецифическую реакцию на ЭМИ. В отличие от сорта Бриз, у сорта Шуга Бон наблюдается как уменьшение в случае P1 и P4 на 22,5 % и 17,5 % соответственно, так и значительное увеличение в 2 раза в варианте P2 содержания хлорофилла *a* (рисунок 6Б).

Хлорофилл *b* (хл *b*) также обладает уникальным физико-химическим свойством поглощать свет в коротковолновой области (425–475 нм), в которой слабо поглощает хл *a*. Хл *b* значительно увеличивает светосбор при пониженной освещенности. Он выступает в качестве дополнительного светособирающего пигмента, увеличивающего общую эффективность фотосинтеза [30].

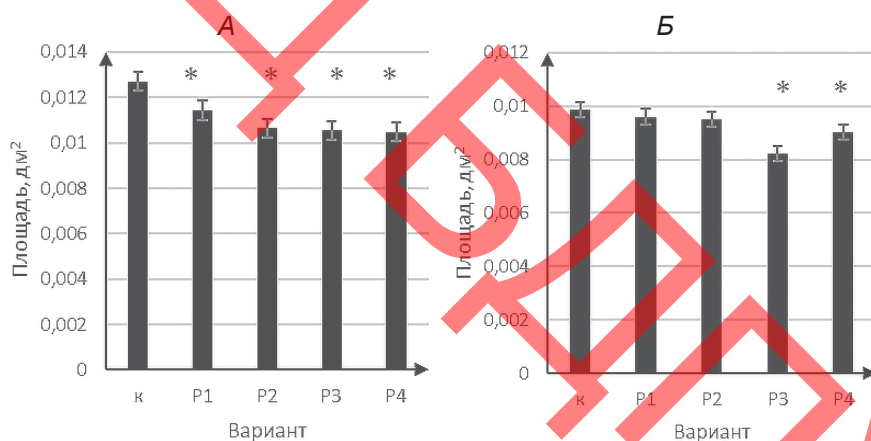


Рисунок 5 – Влияние ЭМИ на площадь листа гороха посевного сортов Бриз (А) и Шуга Бон (Б) (* достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с контролем)

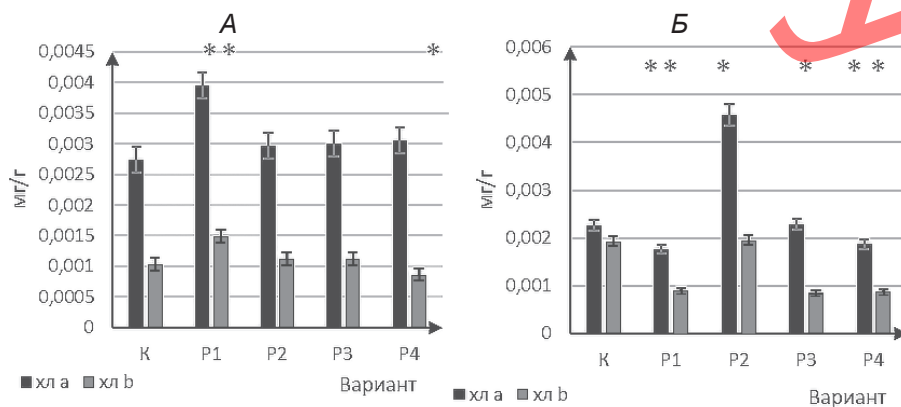


Рисунок 6 – Влияние ЭМИ на накопление хлорофилла *a* и *b* в листьях гороха посевного сорта Бриз (А) и Шуга Бон (Б) (* достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с контролем)

Выявлены специфические сдвиги в накоплении хлорофилла *b* в зависимости от вида ЭМИ в листьях гороха посевного сорта Бриз – повышение его содержания в случаях P1, P2 и P3 на 44,3 %, 8,7 % и 8,3 % соответственно, тогда как Wi-Fi излучение (P4) вызвало снижение уровня хлорофилла *b* на 16,3 % (рисунок 6А). У сорта Шуга Бон наблюдается резкое снижение содержания хлорофилла *b* в первом, третьем и четвертом режимах на 53,7 %, 55,3 % и 54,4 % соответственно (рисунок 6Б).

Из всех классов природных пигментов каротиноиды наиболее широко распространены в природе. Это еще одни компоненты светособирающего комплекса (ССК). Большая роль отводится каротиноидам в структурной стабилизации мембран в ССК фотосистем. Одной из самых важных функций каротиноидов является защита от фотоокисления. Они действуют как антиоксиданты, защищая фотосинтетический аппарат от повреждений, которые вызваны избыточной освещенностью. При интенсивном освещении избыток энергии может приводить к образованию АФК, которые вызывают повреждения клеточных структур. Каротиноиды эффективно нейтрализуют эти АФК, предотвращая фотоокисление. Также увеличение содержания каротиноидов часто наблюдается у растений, подвергающихся различным стрессовым воздействиям – засухе, засолению, экстремальным температурам [31]. Поэтому оценка уровня каротиноидов в листьях гороха посевного, подвергнутого предпосевному электромагнитному воздействию, представляет заметный интерес.

Выявлен достоверный рост в содержании каротиноидов на 41,5 % в случае P1 у сорта Бриз (рисунок 7А). Установлено, что у сорта Шуга Бон снижался общий пул каротиноидов под влия-

нием P1, P3 и P4 на 22,6 %, 19,6 % и 32,6 % соответственно, тогда как в случае P2 данный показатель вырос в 2,7 раза.

Отношение содержания хл *a* / хл *b* – важный показатель, отражающий эффективность поглощения света, состояние фотосинтетического аппарата, способность адаптации растения к условиям освещенности и др. Следовательно, высокое значение отношения хл *a* к хл *b* может указывать на значительную эффективность использования поглощенной энергии для фотосинтеза, а низкое означает, что процесс сбора света ограничен, и не вся поглощенная энергия эффективно используется [32].

Отмечено незначительное снижение в соотношении хлорофиллов у сорта Бриз под влиянием ЭМИ на 5,4 %, 4,3 % и 3,9 % соответственно P2, P3 и P4 (таблица 2). Однако у сорта Шуга Бон выявлен существенный рост данного соотношения на 72,1 %, 45,1 %, 92,6 % и 116,4 % соответственно режимам P1, P2, P3 и P4, что свидетельствует о существенных перестройках в пуле пигментов в сторону роста хл *a*.

Таблица 2 – Влияние режимов ЭМИ на соотношение фотосинтетических пигментов в проростках гороха посевного сортов Бриз и Шуга Бон

Вариант	Соотношение пигментов			
	сорт Бриз		сорт Шуга Бон	
	хл <i>a</i> / хл <i>b</i>	$\Sigma(\text{хл } a + \text{хл } b) / \text{каротиноиды}$	хл <i>a</i> / хл <i>b</i>	$\Sigma(\text{хл } a + \text{хл } b) / \text{каротиноиды}$
К	2,80	5,35	1,22	9,23
P1	2,85	5,76	2,10	7,54
P2	2,65	5,49	1,77	6,77
P3	2,68	6,13	2,35	4,44
P4	2,69	5,84	2,64	7,22

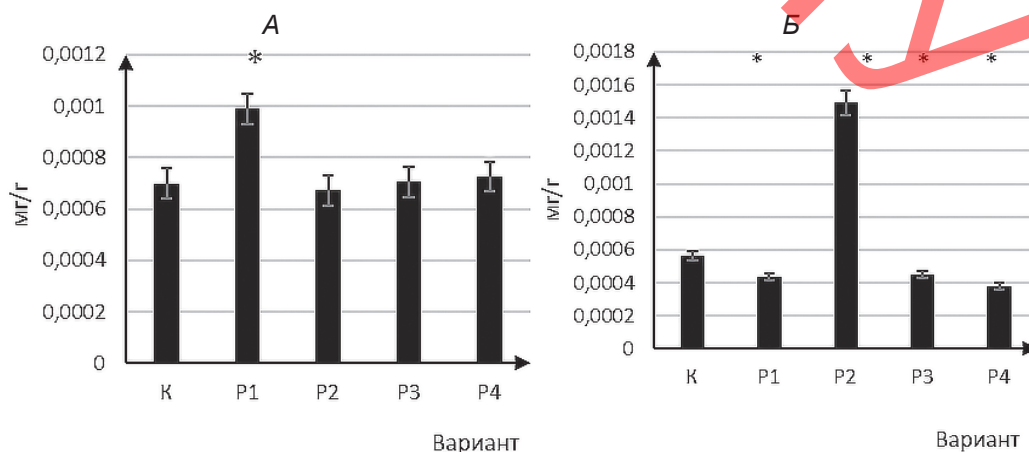


Рисунок 7 – Влияние ЭМИ на количество каротиноидов в листьях гороха посевного сортов Бриз (А) и Шуга Бон (Б) (* достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с контролем)

Отношение хлорофиллов к каротиноидам в листьях растений является комплексным показателем, отражающим баланс между пигментами, участвующими в поглощении света (хлорофиллы и каротиноиды), его использовании, а также в защите фотосинтетического аппарата от повреждений. Высокое значение показателя этого соотношения может указывать на увеличенное содержание хлорофиллов по сравнению с каротиноидами. Это свидетельствует об эффективном использовании света для фотосинтеза, указывая на потенциально более высокую уязвимость к фотоокислению при избытке света. Наоборот, низкое значение данного соотношения может указывать на относительно высокое содержание каротиноидов по сравнению с хлорофиллами, что является показателем повышенной защиты фотосинтетического аппарата от фотоокисления, что характерно для растений, произрастающих в условиях интенсивного солнечного света или других стрессовых факторов [33].

Исходя из данных таблицы 2 можно заключить, что все режимы ЭМИ привели к увеличению соотношения хлорофиллов к каротиноидам относительно контроля у гороха сорта Бриз от 7,7 % (P1) до 14,6 % (P3) (таблица 2). Отмечено снижение данного показателя у сорта Шуга Бон – на 18,3–51,9 % в зависимости от варианта. Это может указывать на сортоспецифическую реакцию на определенную частоту и время воздействия на синтез пигментов и связано со специфическими механизмами адаптации или стресс-реакции у каждого сорта.

Заключение. Результаты эксперимента демонстрируют избирательную реакцию и сортовую специфику гороха посевного в ответ на режимы ЭМИ. Отмечено, что обработка ЭМП СВЧ с микроволновым излучением с тепловым нагревом на частоте 2430 МГц в течение 2 мин (P1) у сорта Бриз не влияла на посевные качества семян, но стимулировала рост вегетативных органов на ранних стадиях прорастания, повышая накопление фотосинтетических пигментов в листьях, тогда как у сорта Шуга Бон снижались все обсуждаемые показатели. Уста-

новлено, что обработка ЭМП СВЧ с микроволновым излучением с тепловым нагревом на частоте 2430 МГц в течение 3 мин (P2) повышала всхожесть и активизировала рост корней и проростков, уровень хлорофилловых пигментов, незначительно снижая содержание каротиноидов у сорта Бриз, в противоположность этому – у сорта Шуга Бон снижалась всхожесть, тормозился рост корней и проростков, но существенно повышался уровень фотосинтетических пигментов в листьях. Выявлено, что предпосевное воздействие ЭМП СВЧ частотой 64–66 ГГц мощностью 10 мВт в течение 12 минут (P3) у сорта Бриз снижало посевные качества семян, стимулировало рост корней и проростков, но при этом практически не влияло на уровень пигментов, в то время как у сорта Шуга Бон наблюдалось повышение посевных качеств семян, стимуляция роста корней, укорочение проростков, но с повышением их массы наблюдалось снижение содержания хл *b* и каротиноидов. Отмечено, что одночасовое Wi-Fi-излучение (P4) у сорта Бриз снижало всхожесть, активизировало преимущественно рост корней по сравнению с проростками, повышало накопление хл *a* в листьях при падении уровня хл *b*, тогда как у сорта Шуга Бон возросла всхожесть, стимулировался рост корней, но при этом снижалось содержание фотосинтетических пигментов листьев.

Таким образом, исследование влияния различных видов ЭМИ на физиолого-биохимические процессы *Pisum sativum* L. сортов Бриз и Шуга Бон продемонстрировало выраженную сортоспецифичность, за исключением влияния на площадь листа, где отмечено снижение данного показателя под воздействием всех режимов у обоих сортов.

Полученные результаты подчеркивают необходимость учета сортовой специфики при использовании электромагнитных полей на горохе посевном. Таким образом, наиболее благоприятным режимом для сорта Бриз является кратковременное воздействие высокоинтенсивным СВЧ-излучением (P1), а вот для сорта Шуга Бон – более продолжительное ЭМИ СВЧ-диапазона (P3) и Wi-Fi-воздействие (P4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений / под ред. М. Н. Третьякова. – М. : Колос, 2000. – 40 с.

REFERENCES

1. Fiziologiya i biokhimiya sel'skohozyajstvennyh rastenij / pod red. M. N. Tretyakova. – M. : Kolos, 2000. – 40 s.

2. Растение и стресс : курс лекций. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1580/4/1333214_lectures.pdf (дата обращения: 24.11.2024).
3. Ерохин, А. И. Физические методы предпосевной обработки семян и эффективность их использования / А. И. Ерохин, З. Р. Цуканова // *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2014. – № 3 (11). – С. 84–88.
4. Влияние предпосевного электромагнитного излучения на рост и развитие растений / Ж. Э. Мазец, Н. В. Пушнина, Н. В. Сергеенко [и др.] // *Біялогія: праблемы выкладання*, 2011. – № 2. – С. 51–55.
5. Таланов, И. П. Влияние электромагнитной обработки семян на повышение урожайности и качества урожая озимой ржи / И. П. Таланов // *Вестник Казанского ГА*. – 2018. – № 1(48). – С. 63–68.
6. Влияние электромагнитного излучения на рост и развитие растений / А. В. Еремина, А. Н. Пашков, Н. М. Карташова [и др.] // *Молодеж. инновационный вестник*. – Том VIII, – № 2. – 2019. – С. 349–350.
7. Шамаль, Н. В. Влияние электромагнитного и ионизирующего излучения на прорастание ячменя / Н. В. Шамаль [и др.] // *Радиобиология = Radiobiology: минимизация радиационных рисков : материалы междунар. науч. конф. 29–30 сент. 2016, г. Гомель / редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : Ин-т радиологии, 2016. – 270 с.*
8. Гапоненко, С. О. Действие электромагнитного излучения на растения / С. О. Гапоненко // *Современные проблемы экспериментальной ботаники: материалы 1 Междунар. науч. конф. молодых ученых, приуроч. к Году науки в Республике Беларусь; г. Минск, 27–29 сент. 2017 г. / Национальная академия наук Беларуси; ГНУ «Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси». – Минск : Колоград, 2017. – С. 175–178.*
9. Антонов, В. Ф. Биофизика мембран / В. Ф. Антонов. – М. : Московская медицинская академия им. И. М. Сеченова. – 1996 – 221 с.
10. Яшин, А. А. Информационно-полевая самоорганизация биосистем / А. А. Яшин // *Вестник новых медицинских технологий*. – 2000. – Т. VII. – №1 – С. 30–38.
11. Влияние слабого электрического воздействия на триггерную систему трансмембранного ионного переноса / Т. Ю. Плюснина, Г. Ю. Ризжеченко, С. И. Аксенов [и др.] // *Биофизика*. – 1994. – Т. 39. – Вып. 2. – С. 89.
12. Казначеев, В. П. Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей / В. П. Казначеев, Л. П. Михайлова. – Новосибирск : Наука, 1985. – 180 с.
13. Изменение фотосинтеза, дыхания и транспорта ионов натрия в ответ на воздействие КВЧ-излучения разных длин волн / А. Х. Тамбиев, Н. Н. Кирокова, Е. Н. Маркарова [и др.]. // *Материалы межд. науч. конф. «Биотехнология на рубеже двух тысячелетий»*. – Саранск, 2001. – С. 257–258.
14. Шаров, В. С. Ускорение перекисного окисления липидов под действием электромагнитного излучения ММ диапазона / В. С. Шаров [и др.] // *Биофизика*. – 1983. – Т. 23. – № 1. – С. 146–147.
2. Rastenie i stress : kurs lekcij. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1580/4/1333214_lectures.pdf (data obrashcheniya: 24.11.2024).
3. Erohin, A. I. Fizicheskie metody predposevnoj obrabotki semyan i effektivnost' ih ispol'zovaniya / A. I. Erohin, Z. R. Cukanova // *Zernobobovye i krupyanye kul'tur*. – 2014. – № 3 (11). – S. 84–88.
4. Vliyanie predposevnogo elektromagnitnogo izlucheniya na rost i razvitie rastenij / Zh. E. Mazec, N. V. Pushnina, N. V. Sergeenko [i dr.] // *Biyalogiya: problemy vykladannya*, 2011. – № 2. – S. 51–55.
5. Talanov, I. P. Vliyanie elektromagnitnoj obrabotki semyan na povyshenie urozhajnosti i kachestva urozhaya ozimoy rzhi / I. P. Talanov // *Vestnik Kazanskogo GA*. – 2018. – № 1(48). – S. 63–68.
6. Vliyanie elektromagnitnogo izlucheniya na rost i razvitie rastenij / A. V. Eremina, A. N. Pashkov, N. M. Kartashova [i dr.] // *Molodezh. innovacionnyj vestnik*. – Tom VIII, – № 2. – 2019. – S. 349–350.
7. Shamal', N. V. Vliyanie elektromagnitnogo i ioniziruyushchego izlucheniya na prorastanie yachmenya / N. V. Shamal' [i dr.] // *Radiobiologiya = Radiobiology: minimizaciya radiacionnyh riskov : materialy mezhdunar. nauch. konf. 29–30 sent. 2016, g. Gomel' / redkol.: I. A. Cheshik (gl. red.) [i dr.]. – Gomel' : In-t radiologii, 2016. – 270 s.*
8. Gaponenko, S. O. Dejstvie elektromagnitnogo izlucheniya na rasteniya / S. O. Gaponenko // *Sovremennye problemy eksperimental'noj botaniki: materialy 1 Mezhdunar. nauch. konf. molodyh uchenyh, priuroch. k Godu nauki v Respublike Belarus'; g. Minsk, 27–29 sent. 2017 g. / Nacional'naya akademiya nauk Belarusi; GNU «Institut eksperimental'noj botaniki im. V. F. Kuprevicha NAN Belarusi». – Minsk : Kolograd, 2017. – S. 175–178.*
9. Antonov, V. F. Biofizika membran / V. F. Antonov. – M. : Moskovskaya medicinskaya akademiya im. I. M. Sechenova. – 1996 – 221 s.
10. Yashin, A. A. Informacionno-polevaya samoorganizaciya biosistem / A. A. Yashin // *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij*. – 2000. – T. VII. – №1 – S. 30–38.
11. Vliyanie slabogo elektricheskogo vozdeystviya na triggerную систему трансмембранного ионного переноса / T. Yu. Plyusnina, G. Yu. Rizzhechenko, S. I. Aksenov [i dr.] // *Biofizika*. – 1994. – T. 39. – Vyp. 2. – S. 89.
12. Kaznacheev, V. P. Bioinformacionnaya funkciya estestvennyh elektromagnitnyh polej / V. P. Kaznacheev, L. P. Mihajlova. – Novosibirsk : Nauka, 1985. – 180 s.
13. Izmenenie fotosinteza, dyhaniya i transporta ionov natriya v otvet na vozdeystvie KVCh-izlucheniya raznyh dlin voln / A. H. Tambiev, N. N. Kirokova, E. N. Markarova [i dr.]. // *Materialy mezhd. nauch. konf. «Biotekhnologiya na rubezhe dvuh tysyacheletij»*. – Saransk, 2001. – S. 257–258.
14. Sharov, V. S. Uskorenie perekisnogo okisleniya lipidov pod dejstviem elektromagnitnogo izlucheniya MM diapazona / V. S. Sharov [i dr.] // *Biofizika*. – 1983. – T. 23. – № 1. – S. 146–147.

15. Пресман, А. С. Электромагнитные поля и живая природа / А. С. Пресман. – М. : Наука, 1968. – 287 с.
16. Бецкий, О. В. Вода и электромагнитные волны / О. В. Бецкий // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 2. – С. 3–6.
17. Бурлакова, Е. Б. Сверхслабые воздействия химических соединений и физических факторов на биологические системы / Е. Б. Бурлакова, А. А. Конрадов, Е. Л. Мальцева // Биофизика. – 2004. – Т. 49. – С. 551–564.
18. Effects of extremely low frequency magnetic field on the antioxidant defence system in mouse brain: a chemoluminescence study / B. C. Lee [et. al.] // J. Photochem. Photobiol. – 2004. – V. 73. – P. 43–48.
19. Половинкина, Е. О. Изменение уровня перекисного окисления липидов и активности компонентов антиоксидантного комплекса в хлоропластах гороха при воздействии слабых импульсных магнитных полей / Е. О. Половинкина, Е. А. Кальясова, Ю. В. Сеницына [и др.] // Физиология растений. – 2011. – Т. 58. – С. 930–934.
20. Пушкина, Н. В. Особенности предпосевного электромагнитного воздействия на отдельные физиолого-биохимические процессы *Leonurus cardiaca* (L.) / Н. В. Пушкина, Ж. Э. Мазец, Е. В. Спиридович [и др.] // Вести БГПУ, Сер. 3. – 2012. – №3 (73) – С. 7–12.
21. Старухин, Р. С. Метод предпосевной обработки семян с использованием эллиптического электромагнитного поля / Р. С. Старухин, И. В. Белицын, О. И. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4 – С. 97–103.
22. Горох посевной // ПермаВики. – URL: https://permaculture.fandom.com/ru/wiki/Горох_посевной (дата обращения: 17.11.2024).
23. Горох – это богатейший источник растительного белка // Сельскохозяйственные вести. – URL: <https://agrinews.ru/novosti/gorokh-eto-bogateyshiy-istochnikov-rastitelnogo-belka/> (дата обращения: 17.11.2024).
24. Лысков, Ю. А. Аминокислоты в питании человека / Ю. А. Лысков // ЭиКГ. – 2012. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aminokisloty-v-pitanii-cheloveka> (дата обращения: 17.11.2024).
25. Горох овощной «Бриз» 10 г, Германия. – URL: <https://www.prosad.by/ovoschi-ru/goroh-boby/goroh-ovoschnoy-mozgovoy-briz-msso.html> (дата обращения: 17.11.2024).
26. Горох сахарный Шуга бон (Германия) (МССО). – URL: <https://www.prosad.by/ovoschi-ru/goroh-boby/goroh-saharnyy-shuga-bon-satimex-msso.html> (дата обращения: 17.11.2024).
27. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84. – Взамен ГОСТ 12038-66; введ. РБ 01.07.1996. – Минск : Гос. комитет по стандартизации РБ, 2019.
28. Мазец, Ж. Э. Практикум по физиологии растений / Ж. Э. Мазец, И. И. Жукова, А. А. Деревинская. – Минск : БГПУ, 2017. – 176 с.
29. Гавриленко, В. Ф. Большой практикум по физиологии растений : учеб.-метод. пособие / В. Ф. Гавриленко, М. Е. Ладыгина, Л. М. Хандобина. – М. : Высш. шк. – 1975. – 322 с.
15. Presman, A. C. Elektromagnitnye polya i zhivaya priroda / A. S. Presman. – M. : Nauka, 1968. – 287 s.
16. Beckij, O. V. Voda i elektromagnitnye volny / O. V. Beckij // Biomedicinskaya radioelektronika. – 1998. – № 2. – S. 3–6.
17. Burlakova, E. B. Sverhslabye vozdejstviya himicheskikh soedinenij i fizicheskikh faktorov na biologicheskie sistemy / E. B. Burlakova, A. A. Konradov, E. L. Mal'ceva // Biofizika. – 2004. – T. 49. – S. 551–564.
18. Effects of extremely low frequency magnetic field on the antioxidant defence system in mouse brain: a chemoluminescence study / B. C. Lee [et. al.] // J. Photochem. Photobiol. – 2004. – V. 73. – P. 43–48.
19. Polovinkina, E. O. Izmenenie urovnya perekisnogo okisleniya lipidov i aktivnosti komponentov antioksidantnogo kompleksa v hloroplastah goroha pri vozdejstvii slabых impul'snyh magnitnyh polej / E. O. Polovinkina, E. A. Kal'jasova, Yu. V. Sinicyna [i dr.] // Fiziologiya rastenij. – 2011. – T. 58. – S. 930–934.
20. Pushkina, N. V. Osobennosti predposevnogo elektromagnitnogo vozdejstviya na otdel'nye fiziologo-biohimicheskie processy Leonurus cardiaca (L.) / N. V. Pushkina, Zh. E. Mazec, E. V. Spiridovich [i dr.] // Vesti BGPU, Ser. 3. – 2012. – №3 (73) – S. 7–12.
21. Staruhin, R. S. Metod predposevnoj obrabotki semyan s ispol'zovaniem ellipticheskogo elektromagnitnogo polya / S. R. Staruhin, I. V. Belicyn, O. I. Homutov // Polzunovskij vestnik. – 2009. – № 4 – S. 97–103.
22. Goroh posevnoj // PermaViki. – URL: https://permaculture.fandom.com/ru/wiki/Goroh_posevnoj (data obrashcheniya: 17.11.2024).
23. Goroh – eto bogateyshij istochnik rastitel'nogo belka // Sel'skohozyajstvennye vesti. – URL: <https://agrinews.ru/novosti/gorokh-eto-bogateyshiy-istochnikov-rastitelnogo-belka/> (data obrashcheniya: 17.11.2024).
24. Lysikov, Yu. A. Aminokisloty v pitanii cheloveka / Yu. A. Lysikov // EiKG. – 2012. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aminokisloty-v-pitanii-cheloveka> (data obrashcheniya: 17.11.2024).
25. Goroh ovoshchnoj «Briz» 10 g, Germaniya. – URL: <https://www.prosad.by/ovoschi-ru/goroh-boby/goroh-ovoschnoy-mozgovoy-briz-msso.html> (data obrashcheniya: 17.11.2024).
26. Goroh saharnyj Shuga bon (Germaniya) (MSSO). – URL: <https://www.prosad.by/ovoschi-ru/goroh-boby/goroh-saharnyy-shuga-bon-satimex-msso.html> (data obrashcheniya: 17.11.2024).
27. Semena sel'skohozyajstvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti: GOST 12038-84. – Vzamen GOST 12038-66; vved. RB 01.07.1996. – Minsk : Gos. komitet po standartizacii RB, 2019.
28. Mazec, Zh. E. Praktikum po fiziologii rastenij / Zh. E. Mazec, I. I. Zhukova, A. A. Derevinskaya. – Minsk : BGPU, 2017. – 176 s.
29. Gavrilenko, V. F. Bol'shoj praktikum po fiziologii rastenij : ucheb.-metod. posobie / V. F. Gavrilenko, M. E. Ladygina, L. M. Handobina. – M. : Vyssh. shk. – 1975. – 322 s.

30. Тютерева, Е. В. Хлорофилл b как источник сигналов, регулирующих развитие и продуктивность растений (обзор) / Е. В. Тютерева, В. А. Дмитриева, О. В. Войцеховская // Сельскохозяйственная биология. – 2017. – Т. 52. – № 5. – С. 843–855.
31. Маслова, Т. Г. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) / Т. Г. Маслова, Е. Ф. Марковская, Н. Н. Слемнев // Журнал общей биологии. – 2020. – Т. 81. – № 4. – С. 297–310.
32. Особенности состава пигментного комплекса листьев древесных растений в городских условиях при внесении микробных удобрений / А. М. Николайчук, А. П. Яковлев, М. Н. Вашкевич [и др.] // Веснік ВДУ. – 2020. – № 1 (106). – С. 95–101.
33. Белова, Т. А. Изменение содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях древесных растений средней полосы России / Т. А. Белова, Л. А. Бабкина // Auditorium. – 2017. – № 2 (14). – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-soderzhaniya-hlorofillov-i-karotinoidov-v-listyah-drevesnyh-rasteniy-sredney-polosy-rossii> (дата обращения: 17.11.2024).
30. Tyutereva, E. V. Hlorofill b kak istochnik signalov, reguliruyushchih razvitie i produktivnost' rastenij (obzor) / E. V. Tyutereva, V. A. Dmitrieva, O. V. Vojcekhovskaya // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. – 2017. – T. 52. – № 5. – S. 843–855.
31. Maslova, T. G. Funkcii karotinoidov v list'yah vysshih rastenij (obzor) / T. G. Maslova, E. F. Markovskaya, N. N. Slemnev // Zhurnal obshchej biologii. – 2020. – T. 81. – № 4. – S. 297–310.
32. Osobennosti sostava pigmentnogo kompleksa list'ev drevesnyh rastenij v gorodskih usloviyah pri vnesenii mikrobnyh udobrenij / A. M. Nikolajchuk, A. P. Yakovlev, M. N. Vashkevich [i dr.] // Vesnik VDU. – 2020. – № 1 (106). – S. 95–101.
33. Belova, T. A. Izmenenie soderzhaniya hlorofillov i karotinoidov v list'yah drevesnyh rastenij srednej polosity Rossii / T. A. Belova, L. A. Babkina // Auditorium. – 2017. – № 2 (14). – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-soderzhaniya-hlorofillov-i-karotinoidov-v-listyah-drevesnyh-rasteniy-sredney-polosy-rossii> (data obrashcheniya: 17.11.2024).