

УДК 612.014.42

**ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН
GLYCINE MAX L. В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОГО ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ**

Чмелёва С. И., Сидякин А. И., Джелдубаева Э. Р., Туманянц К. Н., Авраменко Е. А.

*Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение)
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь,
Республика Крым, Россия
E-mail: chmeleva-s@mail.ru*

Показано положительное превентивное влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) (длина волны – 7,1 мм; частота излучения – 42,3 ГГц; плотность потока мощности облучения – 0,1 мВт/см²) на морфометрические показатели проростков сои культурной (*Glycine max* (L.) Merr.), сорт Аполлон в условиях недостаточного водообеспечения. Так, отмечается увеличение энергии прорастания и лабораторной всхожести семян при предпосевном КВЧ-воздействии при моделируемом осмотическом стрессе у опытных вариантов по сравнению с контрольными. Установлено положительное влияние низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ на морфометрические показатели *Glycine max* L.

Ключевые слова: низкоинтенсивное электромагнитное излучение крайне высокой частоты, предпосевная обработка, соя культурная, морфометрические показатели, недостаточное водообеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях Республики Крым в связи с изменением климатических условий, а также с возрастающим антропогенным воздействием, актуальной является проблема устойчивости культурных растений к различным неблагоприятным факторам внешней среды [1]. Абиотические стрессоры вызывают у растений ряд изменений, которые проявляются на различных уровнях – от молекулярного уровня до организменного, и отражаются на продуктивности.

Засуха является одним из наиболее важных естественных стрессоров. Современные модели изменения климата прогнозируют, что в следующие десятилетия частота, интенсивность и продолжительность засухи увеличится [2]. Территории с засушливым климатом по разным оценкам занимают от 35 до 45 % суши [3, 4]. Засуха – критический фактор, лимитирующий процессы роста и развития растений [3]. В условиях пониженной почвенной влажности быстро тормозится клеточное деление и растяжение, что приводит к формированию мелких клеток. Вследствие этого задерживается рост самого растения, в первую очередь листьев и стеблей. Таким образом, недостаток влаги вызывает значительные и

постепенно усиливающиеся изменения большинства физиологических процессов в организме растений [5].

В связи с этим, изучение механизмов адаптации и устойчивости растений к засухе остается актуальной задачей современных исследований в физиологии растений [6]. Именно почвенная засуха наиболее сильно ингибирует как рост, так и процессы развития растений [7].

Следовательно, приоритетным направлением в растениеводстве является изучение механизма повреждающего действия осмотического стресса, вызванного засухой и способов повышения засухоустойчивости сельскохозяйственных культур. Засухоустойчивость культурных растений определяется совокупностью свойств, в основе которых лежат специфические адаптационные механизмы. Их изучение на разных уровнях организации растений имеет большое значение для увеличения урожая сельскохозяйственных растений на засоленных почвах [8].

Исследование этой проблемы ведется в двух направлениях: изучение физиологических механизмов засухоустойчивости и изменений, происходящих в растении под влиянием засухи [9].

В растениеводстве проводится поиск эффективных стимуляторов роста растений, действие которых направлено на сохранение водного баланса, увеличение урожая и повышение устойчивости растений к неблагоприятным факторам внешней среды, в частности к осмотическому стрессу. К таким стимуляторам можно отнести технологии, которые основываются на воздействии физических факторов, например, низкоинтенсивное электромагнитное излучение (ЭМИ) крайне высокой частоты (КВЧ).

Применение КВЧ-излучения является простым, дешевым (малое энергопотребление) и экологически безопасным методом воздействия на прорастающие семена и может применяться для регуляции всхожести семян [10].

По данным литературы целенаправленное воздействие низкоинтенсивного КВЧ-излучения оказывает влияние на показатели роста и развития растений. Так, например, КВЧ-воздействие на растениях показало значительное увеличение всхожести семян и ускорение их роста по сравнению с необлученными семенами [11].

Показано, что воздействие ЭМИ КВЧ-излучения эффективно как в биологии и биотехнологии, а также в фармакологии, экспериментальной медицине, ветеринарии, растениеводстве, пищевой промышленности, физике, химии и т.д. [12, 13].

Соя культурная является одной из распространенных зернобобовых и масличных культур. Экономически выгодная культура и отличается высокой экологичностью, так как не требует внесения синтетических азотных удобрений, однако является не устойчивой культурой к осмотическому стрессу [14, 15].

Так как действие КВЧ-излучения на ранние стадии онтогенеза *Glycine max* L. сорта Аполлон в условиях осмотического стресса не изучено, это и послужило целью наших исследований.

Цель работы – изучение влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) (длина волны – 7,1 мм; частота излучения – 42,3 ГГц; плотность потока мощности облучения – 0,1 мВт/см²) на

морфометрические показатели *Glycine max* L. в условиях недостаточного водообеспечения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная часть исследований проводилась на базе кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий, а также кафедры физиологии человека и животных и биофизики Института биохимических технологий экологии и фармации ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», в период 2021–2022 гг.

Объектом наших исследований служили семена и растения сои культурной (*Glycine max* (L.) Merr.), сорт Аполлон.

При проведении экспериментов использовали терапевтические генераторы «КВЧ. РАМЕД-ЭКСПЕРТ – 01» (регистрационное свидетельство № 783/99 от 14.07.99, выданное КНМТ МОЗ Украины о праве на применение в медицинской практике в Украине).

Семена подвергались воздействию данного физического фактора однократно непосредственно перед посевом, экспозиция 30 минут.

Семена сои культурной (*Glycine max* L.), сорт Аполлон отбирали по средним размерам и замачивали на 20 минут в растворе перекиси водорода для дезинфекции.

Семена проращивали в кюветах на увлажненной фильтровальной бумаге по 25 семян в каждой, по 3 повторности. Для моделирования осмотического стресса в кюветы приливали по 150 мл раствора с концентрацией сахарозы – 4,4 % , 7,4 % и 10,5 % , что которые создавали осмотическое давление: 6, 9 и 12 атмосфер (атм), соответственно. В контрольном варианте семена проращивали с добавлением дистиллированной воды. На седьмые сутки определяли прорастание семян (P, %). Для этого в опытном и контрольном вариантах подсчитывали количество семян, давших корешок минимальной длины, затем среднее количество проросших семян в растворе сахарозы (a) выражали в процентах от числа семян, проросших в контроле (b), то есть

$$P = (a/b) \times 100 \% \quad (1)$$

Чем выше процент прорастания семян в растворе сахарозы, тем более засухоустойчив образец.

Схема опыта:

Контроль 1 – семена, с добавлением H₂O дист.;

Контроль 2 – семена, подвергнутые КВЧ-облучению;

Опыт 1 – семена, с добавлением 4,4 % сахарозы;

Опыт 2 – семена, с добавлением 7,4 % сахарозы;

Опыт 3 – семена, с добавлением 10,5 % сахарозы;

Опыт 4 – семена, подвергнутые КВЧ-облучению, с добавлением в чашки Петри 4,4 % сахарозы;

Опыт 5 – семена, подвергнутые КВЧ-облучению, с добавлением в чашки Петри 7,4 % сахарозы;

Опыт 6 – семена, подвергнутые КВЧ-облучению, с добавлением в чашки Петри

10,5 % сахарозы.

Кюветы помещали в термостат типа (ТС–80–М–2) для проращивания (в течение 3 суток в темноте при +25 °С). Согласно требованиям государственного стандарта для сельскохозяйственных культур 12038–84 для *Glycine max* L. энергия прорастания определяется на 3-е сутки, а всхожесть семян на 7-е сутки.

Определение морфометрических показателей проводилось на 4-е, 7-е и 10-е сутки по общепринятым в физиологии растений методикам [16]. В качестве морфометрических показателей исследовались: высота растений, длина главного корня [16].

Определение полевой влажности. Для определения полевой влажности на месте взятия образца брали ножом массу почвы с заданной глубины. На технологических весах взвешивали алюминиевый стаканчик с крышкой, помещали в него 1/2–1/3 объема почвы и снова взвешивали, закрыв крышку. Образец высушивали в сушильном шкафу при температуре 105° С в течение 5 часов и после охлаждения снова взвешивали. Полевую влажность рассчитывали в весовых процентах по формуле:

$$A = a/v*100, \quad (2)$$

где А – полевая влажность, % (весовой); а – масса испарившейся влаги, г; в – масса сухой почвы; 100 – коэффициент в пересчете на % [16].

Оценка засухоустойчивости *Glycine max* L. по всхожести семян. При определении засухоустойчивости показателем устойчивости является всхожесть семян [16].

По результатам эксперимента были выделены следующие группы устойчивости семян, представленные в табл. 1.

Таблица 1.

Группы семян по засухоустойчивости

Группы засухоустойчивости	Процент всхожести семян соответственно группе
I – высокоустойчивые	> 80 %
II – устойчивые	61 – 80 %
III – среднеустойчивые	41 – 60 %
IV – слабо устойчивые	21 – 40 %
V – очень слабоустойчивые	< 20 %

Статистическую обработку полученных данных осуществляли, рассчитывая среднюю арифметическую и стандартную ошибку средней арифметической, стандартное отклонение, критерий достоверности Стьюдента для сравнения двух выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных нами исследований по изучению низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ на энергию прорастания семян *Glycine max* L. при модулируемой почвенной засухе представлены в табл. 2. Так, энергия прорастания в контрольном варианте составляет 75 %. КВЧ-воздействие на семена *Glycine max* L. вызвало увеличение данного показателя на 11 %.

Таблица 2.

Влияние низкоинтенсивного КВЧ-излучения на энергию прорастания и всхожесть семян *Glycine max* L. при осмотическом стрессе

Варианты опыта	Энергия прорастания, %	% к Контролю 1	Всхожесть семян, %	% к Контролю 1
Контроль 1 (H ₂ O)	75,0 ± 1,8	100,0	90,0 ± 2,1	100,0
Контроль 2 (КВЧ)	86,0 ± 1,7 *	114,7	98,0 ± 2,3 *	108,9
4,4 % сахарозы	67,0 ± 2,0 *	89,3	74,0 ± 2,0 *	82,2
4,4 % сахарозы + КВЧ	74,0 ± 1,5 *	98,7	82,0 ± 2,4 *	91,1
7,4 % сахарозы	62,0 ± 2,4 ***	82,7	66,0 ± 3,2 ***	73,3
7,4 % сахарозы + КВЧ	69,0 ± 2,0 н/д	92,0	70,0 ± 2,4 **	77,8
10,5 % сахарозы	50,0 ± 2,0 *	66,7	52,0 ± 1,4 ***	57,8
10,5 % сахарозы + КВЧ	54,0 ± 2,2 *	72,0	58,0 ± 2,0 **	64,4

Примечание к таблице: Указаны средние ± стандартная ошибка средней; звездочками отмечены достоверные различия по сравнению с контролем при *P≤0,05; **P≤0,01; ***P≤0,001; н/д – различия недостоверны.

Установлено, что в условиях недостаточного водообеспечения, вызванного сахарозой в концентрации 4,4 % (что соответствует 50–55 % от ППВ) энергия прорастания уменьшается в среднем на 8 % по сравнению с контролем 1 (70 % от ППВ). При предпосевном облучении ЭМИ и моделируемом осмотическом стрессе, энергия прорастания составляет 76 %, что на 4 % выше контроля 1. Следовательно, можно сделать вывод, что предпосевная обработка *Glycine max* L. повышает засухоустойчивость данной культуры и оказывает адаптогенное действие при осмотическом стрессе.

Установлено, что в условиях недостаточного водообеспечения, вызванное 7,4 % сахарозой (что соответствует 40–45 % от ППВ), облучение увеличивает энергию прорастания до показателя равному 69 %, что в среднем на 7 % выше, чем в вариантах без обработки (см. табл. 2). Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что низкоинтенсивное облучение развивает адаптогенные механизмы растений к влиянию недостаточного водообеспечения и достоверно повышает устойчивость проростков *Glycine max* сорта Апполон к осмотическому стрессу.

Как показали исследования, в условиях недостаточного водообеспечения показатели лабораторной всхожести семян изменяются также, как и показатели энергии прорастания. Так, например, в условиях осмотического стресса, вызванного 4,4 % сахарозой, у опытных вариантов процент всхожести семян составляет 74 %, тогда как у опытных вариантов, прошедших предварительное предпосевное облучение, изучаемый показатель на 8 % выше и составляет 82 % (табл. 2).

Влияние осмотического стресса на *Glycine max* L. начинается на начальном этапе, вследствие недостаточного поступления влаги в семена. С повышением осмотического стресса и влиянием его на прорастание семян, показатели энергии прорастания в опытных вариантах значительно снижаются, что приводит к уменьшению показателей всхожести при недостаточном водообеспечении, вызванном 7,4 % и 10,5 % сахарозы. Под действием абиотического стрессового фактора интенсивность обмена веществ в семенах снижается, что оказывает негативное влияние как на прорастание семян, так и на начальные процессы роста и развития проростков сои. Так, например, при осмотическом стрессе, вызванном 7,4 % и 10,5 % сахарозой, энергия прорастания семян достоверно понижается на 13,0 % и 25,0 %, соответственно. При наибольшем содержании сахарозы в среде проращивания, а именно 10,5 % сахарозы, прорастание семян ниже всех показателей вариантов опыта и составляет 50 %, что может быть связано с развитием плазмолиза в клетках, тормозящее прорастание семян.

Как показали исследования, предпосевная обработка семян с помощью КВЧ-излучения стимулирует повышение энергии прорастания *Glycine max* L. у опытных вариантов, по сравнению с контрольными вариантами. Так, например, в вариантах с 4,4 % + КВЧ энергия прорастания семян составляет 74 %, что на 7 % выше, чем у контрольных вариантов, проращиваемых в условиях осмотического стресса.

С возрастанием осмотического стресса, влияние КВЧ излучения на семена прослеживается. Низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ достоверно повышают энергию прорастания в опытных вариантах с 7,4 % и 10,5 % сахарозы в среднем, на 6–7 % по сравнению с контрольными вариантами.

Установленная тенденция положительного влияния КВЧ-излучения на энергию прорастания семян *Glycine max* L. прослеживается и при оценке лабораторной всхожести. При нормальных условиях данный параметр в среднем на 8 % выше контроля 1. При моделируемом осмотическом стрессе предварительное облучение дало положительный эффект – лабораторная всхожесть опытных растений увеличилась в среднем на 13 % по сравнению с контрольными (см. табл. 2).

Облученные семена быстрее набухали, что связано с повышением проницаемости мембран клеток оболочки семени для воды посредством изменения биофизических характеристик плазмалеммы.

Вместе с тем, что КВЧ-воздействие не вызвало в ходе проведения эксперимента видимых аномалий прорастания, способствовало ускорению роста зародышевого корешка, что могло быть связано с индукцией электрического потенциала и активацией роста рывжением вследствие электроиндуцированных потоков ионов.

Эффект влияния излучения зависит от параметров режима обработки семян, которые в свою очередь имеют индивидуальные характеристики для конкретного

вида семян и зависят от геометрического размера данных семян, влажности и целого ряда других как физиологических, так и радиофизических характеристик.

В результате выполненных исследований установлено, что ЭМИ выполняет адаптогенную функцию к воздействию в условиях моделируемого недостаточного водообеспечения на *Glycine max* L. Так в варианте с 4,4 % сахарозы (что соответствует 50–55 % от ППВ) лабораторная всхожесть семян увеличилась на 8 % по сравнению с контрольным вариантом 1 (семена не облученные ЭМИ КВЧ). Данную тенденцию мы прослеживаем и в опытном варианте с 7,4 % сахарозы (что соответствует 40–45 % от ППВ). При моделируемом осмотическом стрессе показатель всхожести семян вырос на 8 % относительно семян без воздействия на них излучения.

В основе адаптогенного действия растений к осмотическому стрессу лежат определенные физиологические механизмы, которые запускают реакции обмена веществ и стимулируют прорастание семян. Повысить засухоустойчивость возможно, применяя различные методы закаливания и обработки семян, которые будут способствовать мобилизации естественных механизмов защиты и появлению физиологических адаптаций. Положительный эффект воздействия ЭМИ КВЧ на сухие семена исследуемой культуры имеет практическое значение для технологии предпосевной обработки потому, что не требует предварительного замачивания семян, давая при этом заметное ростовое преимущество.

Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на изменение засухоустойчивости *Glycine max* L.

Как показали исследования, установлено, что низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ повышает устойчивость сои культурной к воздействию засоления, и, как следствие, увеличивает адаптационные свойства растения.

В ходе эксперимента было зафиксировано, что предпосевное облучение семян КВЧ увеличивает засухоустойчивость. Следовательно, при оптимальных условиях проращивания семена *Glycine max* являются высокоустойчивыми, а после предпосевного облучения сухих семян крайневисокочастотным излучением – высокоустойчивыми, при этом всхожесть увеличивается в среднем на 8 % (табл. 3).

Как свидетельствуют данные из таблицы 3 в условиях 10,5 % сахарозы, что соответствует 30–35 % от ППВ, ЭМИ не оказало значительного влияние на показатель засухоустойчивости *Glycine max* (сорт Аполлон) и данные растения считаются устойчивыми.

Таким образом, анализ экспериментальных данных, можно сделать вывод о адаптогенном действии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на *Glycine max* при моделируемом осмотическом стрессе.

Таблица 3.
Влияние КВЧ на изменение засухоустойчивости *Glycine max* (сорт Аполлон) в условиях недостаточного водообеспечения

Варианты опыта	Всхожесть семян, %	Группы по засухоустойчивости
Контроль 1 (H ₂ O)	90,0 ± 2,1	I
Контроль 2 (КВЧ)	98,0 ± 2,3 *	I
4,4 % сахарозы	74,0 ± 2,0 *	II
4,4 % сахарозы + КВЧ	82,0 ± 2,4 ^{н/д}	I
7,4 % сахарозы	66,0 ± 3,2 ***	II
7,4 % сахарозы + КВЧ	70,0 ± 2,4 **	II
10,5 % сахарозы	52,0 ± 1,4 ***	III
10,5 % сахарозы + КВЧ	58,0 ± 2,0 ***	III

Примечание к таблице: Указаны средние ± стандартная ошибка средней; звездочками отмечены достоверные различия по сравнению с контролем при *P≤0,05; **P≤0,01; ***P≤0,00, н/д – различия недостоверны. Группы растений по солеустойчивости: I – высокоустойчивые, II – устойчивые, III – среднеустойчивые, IV – слабоустойчивые, V – очень слабоустойчивые.

Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на морфометрические параметры растений *Glycine max* L. в условиях недостаточного водообеспечения

Результаты исследования показали, что предварительное КВЧ-воздействие на семена сои культурной сорта Аполлон способствовало повышению их посевных качеств. Проростки, выращенные из семян, прошедших предпосевное облучение, обладают более высоким потенциалом развития, по сравнению с контрольными растениями.

Семена, прошедшие предпосевную обработку, выращивали в лабораторных условиях при температуре от +22 до +24 °С в течение 3 недель при четырех уровнях влажности почвы: оптимального – 70 % от полной полевой влагоемкости (ППВ) и засушливого – 30–35 %; 40–45 % и 50–55 % от ППВ. Влажность почвы периодически определяли и поддерживали на заданном уровне до конца эксперимента.

При нормальных условиях проращивания сои культурной до седьмых суток было установлено, что высота стебля составляет 12,9 см, а при действии почвенной засухи, вызванной недостаточным содержанием влаги, высота заметно понижается (табл. 4).

В ходе проведенных исследований была выявлена закономерность увеличения морфометрических показателей при предварительном воздействии на семена ЭМИ КВЧ. Так, например, в контрольном варианте 2 (при нормальных условиях) длина надземной части 7-дневного растения составляет 16,3 см, что на 3,4 см выше, чем у контрольного варианта 1.

Таблица 4.
Влияние ЭМИ ММ на высоту надземной части *Glycine max* L.

Варианты опыта	Высота надземной части, см (M±m)	
	7-е сутки	10-е сутки
Контроль H ₂ O (70 % ПВ)	12,9 ± 0,3	17,1 ± 0,3
Контроль2 (КВЧ)	16,3 ± 0,2 *	18,4 ± 0,4 ***
Водный дефицит (55 % ПВ)	9,8 ± 0,2 *	11,4 ± 0,5 *
Водный дефицит (45 % ПВ)	7,4 ± 0,3*	8,2 ± 0,3 *
Водный дефицит (35 % ПВ)	6,2 ± 0,2	7,9 ± 0,2
Водный дефицит (55 % ПВ) + КВЧ	10,8 ± 0,4 ***	13,4 ± 0,3 **
Водный дефицит (45 % ПВ) + КВЧ	8,1 ± 0,1 *	10,2 ± 0,2 *
Водный дефицит (35 % ПВ) + КВЧ	7,1 ± 0,3	8,8 ± 0,3

Примечание к таблице: Указаны средние ± стандартная ошибка средней; звездочками отмечены достоверные различия по сравнению с контролем при *P≤0,05; **P≤0,01; ***P≤0,001.

При действии длительного осмотического стресса на ранних этапах онтогенеза *Glycine max*, морфометрические параметры проростков существенно снижаются начиная с 7-х суток. Это можно объяснить тем, что осмотический стресс оказывает подавляющее действие на процессы митотического цикла, это и обуславливает замедление развития растений. Что касается надземных органов, то в стебле наиболее подвержены воздействию стрессового фактора (а именно засоления) клетки проводящей системы.

Так, при искусственно созданом осмотическом стрессе (водный дефицит 35 % ПВ) наблюдается ингибирование роста *Glycine max*. Опытные растения на 6,7 см ниже контрольный (см. табл. 4). Данную реакцию растения можно объяснить тем, что данная культура, а именно *Glycine max* (сорт Аполлон), относится к сельскохозяйственным растениям, нуждающимся в систематическом поливе.

При выращивании опытных растений в условиях водный дефицит 45 % ПВ исследуемый параметр – высота побега, на 7-е сутки снизился в среднем на 5,5 см. по сравнению с контрольными вариантами опыта. Более высокий осмотический стресс, вызванный водным дефицитом 35 % ПВ ингибирует рост надземной части растения на 6,7 см по сравнению с контролем 1 и на 10,1 см – с контролем 2. Следует отметить, что предварительное облучение семян ЭМИ ММ у 7-дневных проростков стимулирует увеличение высоты надземных органов *Glycine max* L., а у 10-дневных стимулирующий эффект также выражен (табл. 4).

Ингибирующее действие недостаточное водообеспечение, прежде всего, сказывается на развитии корневой системы, уже на начальных этапах развития *Glycine max* L. Так, например, в опытном варианте с водным дефицит (55 % ПВ) длина корня 4-х дневных проростков *Glycine max* L. составляет 4,8 см, но при

обработке семян, перед проращиванием, длина равняется 5,8 см, что на 10 см превышает контрольный вариант (табл. 5).

Таблица 5.
Влияние ЭМИ ММ на длину главного корня *Glycine max L.*

Варианты опыта	Длина главного корня, см (M±m)		
	4-е сутки	7-е сутки	10-е сутки
Контроль H ₂ O (70 % ПВ)	7,2 ± 0,3	8,5 ± 0,1	10,6 ± 0,2
Контроль2 (КВЧ)	8,7 ± 0,3 ***	9,9 ± 0,3 *	11,3 ± 0,3 *
Водный дефицит (55 % ПВ)	4,8 ± 0,1 *	5,6 ± 0,2 *	6,5 ± 0,3 *
Водный дефицит (45 % ПВ)	2,6 ± 0,1 *	3,0 ± 0,2 *	3,5 ± 0,3 **
Водный дефицит (35 % ПВ)	2,1 ± 0,2	3,0 ± 0,3	3,9 ± 0,2
Водный дефицит (55 % ПВ) + КВЧ	5,8 ± 0,2 *	6,4 ± 0,2 **	6,9 ± 0,3 **
Водный дефицит (45 % ПВ) + КВЧ	3,9 ± 0,2 *	4,5 ± 0,2 *	5,0 ± 0,2 *
Водный дефицит (35 % ПВ) + КВЧ	3,4 ± 0,3	4,0 ± 0,1	4,7 ± 0,1

Примечание к таблице: Указаны средние ± стандартная ошибка средней; звездочками отмечены достоверные различия по сравнению с контролем при *P≤0,05; **P≤0,01; ***P≤0,001.

Длина корневой системы на четвертые сутки проращивания в контрольном варианте 1 равна 7,2 см, что на 1,5 см меньше чем в контрольном варианте семена которого подвергались тридцатиминутному предпосевному облучению.

Исследование морфометрических признаков – длины главного корня на 4 сутки показало, что предпосевная обработка семян ЭМИ оказывает положительный эффект, стимулируя данный показатель в среднем, на 16 % относительно контроля 1.

ЭМИ оказывает адаптогенное действие и при более высоком осмотическом стрессе, а именно при водном дефиците 45 % ПВ. В опытном варианте при водном дефиците 45 % ПВ длина главного корня равна 2,6 см, а в варианте, семена которых подверглись облучению ММ диапазона – 3,9 см, что в 1,5 раза больше.

Стоит отметить, что моделируемый нами в лабораторных условиях осмотический стресс, вызванный недостаточным водообеспечением при водном дефиците 45 % ПВ ингибировал начальное развитие корневой системы *Glycine max L.* Это можно объяснить тем, что выбранная нами культура в качестве объекта исследования, является не устойчивой к влиянию засухи.

Дальнейшее культивирование *Glycine max L.* показывает, что стимулирующий эффект влияния КВЧ излучения на длину корневой системы сохраняется в динамике развития и до 7-х, и до 10-х суток.

Так, например, при оптимальных условиях культивирования, на седьмые сутки длина главного корня в контрольном варианте опыта (с действием электромагнитного излучения) равняется 9,9 см, что является выше на 1,6 см, чем контрольный вариант.

В результате анализа влияния водного стресса на сою мы наблюдаем, что осмотический стресс, вызванный недостаточным водообеспечением, ингибирует рост корневой системы. С повышением уровня стресса, эффект негативного влияния повышается. Как видно из данных таблицы, на четвертые сутки длина корня у 7-дневных растений при водном дефиците 35 % ПВ равна 3,0 см, а в контрольном варианте – 8,3 см разница составляет 5,3 см. Проследивая в динамике рост и развитие корневой системы *Glycine max* L. в условиях повреждающего действия абиотического фактора можно отметить, что на 7-е сутки исследуемый показатель равен 3,9 см. Данное значение отличается от контроля 1 на 6,7 см. На протяжении всего эксперимента данная закономерность влияния негативного абиотического фактора сохраняется.

Проведя оценку морфометрических параметров проростков *Glycine max* L. культивируемых при моделируемой почвенной засухе можно сделать вывод, что высота побега и длина главного корня существенно отличается уже у 3-дневных проростков по сравнению с контрольными растениями, пророщенными в нормальных условиях. Это можно объяснить нарушением водного обмена у проростков на самых ранних этапах роста и развития.

Достоверно полученные экспериментальные данные по предпосевному облучению семян миллиметровыми волнами позволяют говорить о применении миллиметрового облучения для *Glycine max* L. как экологически чистой технологии, что приводит к увеличению морфометрических параметров у исследуемых растений, при неблагоприятных условиях среды, а именно осмотическом стрессе.

Как свидетельствуют полученные экспериментальные данные, использование низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона приводит к повышению значений всех исследуемых параметров у опытных растений по сравнению с контрольными растениями в условиях осмотического стресса, вызванного недостаточным водообеспечением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что предпосевное облучение ЭМИ КВЧ повышает засухоустойчивость *Glycine max* L. сорта Аполлон. Энергия прорастания и лабораторная всхожесть увеличивается в среднем на 8–12 % при моделируемом осмотическом стрессе у опытных вариантов по сравнению с контрольными.
2. Установлено положительное влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на морфометрические показатели *Glycine max* L., при этом достоверно увеличивается высота побега на 14 %, длина главного корня – на 18 % у опытных растений по сравнению с контрольными, в условиях недостаточного водообеспечения.

Работа выполнена на базе ЦКП «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

Список литературы

1. Бугара А. М. Влияние препарата «Geoplus» на устойчивость к засолению и засухе растений кукурузы на ранних этапах онтогенеза / А. М. Бугара, С. Н. Кабузенко, А. В. Омельченко // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: Биология, химия. – 2006. – Т. 19 (58), № 1. – С. 3–7.
2. Chaves M. M. Photosynthesis under Drought and Salt Stress: Regulation Mechanisms from Whole Plant to Cell / Chaves M. M., Flexas J., Pinheiro C. // *Ann. Bot.* – 2009. – Vol. 103. – P. 551–560.
3. Жук О. И. Адаптация растений к почвенной засухе / О. И. Жук // Физиология и биохимия культурных растений. – 2022. – Т. 43, № 1. – С. 26–37.
4. Пьянков В. И. Основные тенденции изменения растительности Земли в связи с глобальным потеплением климата / В. И. Пьянков, А. Т. Мокроносов // Физиология растений. – 1993. – Т. 40, № 4. – С. 515–531.
5. Генкель П. А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений / П. А. Генкель – М.: Высшая школа, – 1982. – 280 с.
6. Маевская С. Н. Реакция антиоксидантной и осмопротекторной систем проростков пшеницы на засуху и регидратацию / Маевская С. Н., Николаева М. К. // Физиология растений. – 2013. – Т. 60, № 3. – С. 351–359.
7. Николаев Е. В. Устойчивое функционирование аграрной отрасли Крыма в условиях рыночной экономики / Е. В. Николаев. – Симферополь, 2004. – 48 с.
8. Веселов Д. С. Реакция растений на засоление и формирование солеустойчивости / Д. С. Веселов, И. В. Маркова, Г. Р. Кудоярова // Успехи современной биологии. – 2007. – Т. 127, №5. – С. 482–493.
9. Терлецкая Н. В. Повреждающее действие абиотических стрессов на растительные клетки зерновых злаков / Н. В. Терлецкая // Труды Никитского ботанического сада. – 2009. – Т. 131. – С. 152–155.
10. Леус Н. Ф. Влияние микроволнового поля на некоторые химические показатели зерна пшеницы и ячменя / Н. Ф. Леус, С. Г. Коломийчук, Л. Г. Калинин [и др.] // Хранение и переработка зерна. – 2001. – № 1. – С. 41–44.
11. Теплякова Т. Е. Соя / Т. Е. Теплякова // В сб.: Теоретические основы селекции. Том. III. Генофонд и селекция зерновых бобовых культур (люпин, вика, соя, фасоль). – С-Пб.: ВИР, 1995 – С. 196–217.
12. Чуян Е. Н. Физиологические механизмы биологических эффектов низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ / Е. Н. Чуян, Н. А. Темурьянц, О. Б. Московчук [и др.]. – Симферополь: ЧП «Эльиньо», 2003. – 448 с.
13. Чуян Е. Н. Нейроэндокринные механизмы действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайневысокой частоты (часть 1) / Е. Н. Чуян, Н. А. Темурьянц // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2005. – № 2 (38). – С. 3–22.
14. Балакай Г. Т. Соя: экология, агротехника, переработка / Г. Т. Балакай, О. С. Безуглова. – Ростов на Дону: Феникс, 2003. – С. 160.
15. Баранов В. Ф. Соя, биология и технология возделывания / В. Ф. Баранов, В. М. Лукомец. – Краснодар, 2005. – 433 с.
16. Третьяков Н. Н. Практикум по физиологии растений / Н. Н. Третьяков [и др.]: под ред. Н. Н. Третьякова – Москва: Колосс, 2003. – 288 с.

INFLUENCE OF LOW-INTENSITY ELECTROMAGNETIC RADIATION OF A MILLIMETER RANGE ON THE GERMINATION OF *GLYCINE MAX* L. SEEDS UNDER CONDITIONS OF INSUFFICIENT WATER SUPPLY

Chmeleva S. I., Sidyakin A. I., Dzheldubaeva E. R., Tumanyants K. N., Avramenko E. A.

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russian Federation
E-mail: chmeleva-s@mail.ru*

In crop production, a search is being made for effective plant growth stimulants, the action of which is aimed at maintaining water balance, increasing yields and increasing plant resistance to adverse environmental factors, in particular, to osmotic stress. Such stimulants include technologies that are based on the influence of physical factors, for example, low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency. Since the effect of EHF radiation on the early stages of the ontogeny of *Glycine max* L. cv. Apollon under osmotic stress has not been studied, this was the purpose of our research.

The purpose of the work is to study the effect of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency (EMR EHF) (wavelength – 7.1 mm; radiation frequency – 42.3 GHz; radiation power flux density – 0.1 mW / cm²) on the morphometric parameters of *Glycine max* L in conditions of insufficient water supply.

The results showed that the germination energy of *Glycine max* L. seeds under the influence of low-intensity EMR EHF significantly increased in comparison with the control values. With presowing EMR irradiation and simulated osmotic stress, the germination energy is 76 %, which is 4 % higher than the control. Therefore, it can be concluded that presowing treatment with *Glycine max* L. increases the drought tolerance of this crop and has an adaptogenic effect under osmotic stress. Analyzing the obtained data, it can be concluded that low-intensity irradiation develops adaptogenic mechanisms of plants to the influence of insufficient water supply and significantly increases the resistance of *Glycine max* seedlings of the Apollon variety to osmotic stress.

The established trend of the positive effect of EHF radiation on the germination energy of *Glycine max* L. seeds can also be traced when assessing laboratory germination. With simulated osmotic stress, preliminary irradiation had a positive effect – the laboratory germination of experimental plants increased compared to control values.

The positive effect of exposure to EMR EHF on dry seeds of the studied crop is of practical importance for the technology of presowing treatment because it does not require pre-soaking of seeds, while giving a noticeable growth advantage.

It is shown that presowing irradiation of seeds with EHF increases drought resistance. Therefore, under optimal germination conditions, *Glycine max* seeds are highly resistant, and after pre-sowing irradiation of dry seeds with extremely high-frequency radiation, they are highly resistant, while germination increases.

The results of the study showed that the preliminary EHF-exposure to the Apollon soybean seeds contributed to the improvement of their sowing qualities. Seedlings grown from seeds that underwent presowing irradiation have a higher development potential compared to control plants.

Reliably obtained experimental data on presowing irradiation of seeds with millimeter waves allow us to speak about the use of millimeter irradiation for *Glycine max* L. as an environmentally friendly technology, which leads to an increase in morphometric parameters in the studied plants, under adverse environmental conditions, namely osmotic stress.

As evidenced by the obtained experimental data, the use of low-intensity EMR EHF range leads to an increase in the values of all the studied parameters in experimental plants compared to control plants under conditions of osmotic stress caused by insufficient water supply.

Keywords: low intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency, pre-sowing treatment, cultivated soybean, morphometric indicators, insufficient water supply.

References

1. Bugara A. M., Kabuzenko S. N., Omelchenko A. V. Influence of the «Geoplus» drug on the resistance to salinization and drought of maize plants at the early stages of ontogenesis, *Scholars of Tavrich National University named after V. Vernadsky. Series: Biology, Chemistry*, **19 (58)**, 1, 3 (2006).
2. Chaves M. M., Flexas J., Pinheiro C. Photosynthesis under Drought and Salt Stress: Regulation Mechanisms from Whole Plant to Cell, *Ann. Bot.*, **103**, 551 (2009).
3. Beetle O. I. Adaptation of plants to soil drought, *Physiology and biochemistry of cultural plants*, **43(1)**, 26 (2022).
4. Piankov V. I., Mokronosov A. T. Main trends in vegetation of the Earth due to global warming of the climate, *Physiology of plants*, **40 (4)**, 515 (1993).
5. Genkel P. A. Physiology of heat and drought resistant plants, *M.: High School*, 280 (1982).
6. Maevskaya S. N., Nikolaeva M. K. Reaction of antioxidant and osprotector systems of wheat germination to drought and rehydration, *Physiology of plants*, **60 (3)**, 351 (2013).
7. Nikolaev E. V. Sustainable functioning of the agrarian sector of Crimea in the conditions of market economy, *Simferopol*, 48 (2004).
8. Veselov D. S., Markova I. V., Kudoyarova G. R. Reaction of plants to salinization and formation of salt resistance, *Successes of modern biology*, **127(5)** 482 (2007).
9. Terletskaya N. V. Damaging action of abiotic stress on plant cells of cereal grains, *Works of the Nikitsky Botanical Garden*, **131**, 152 (2009).
10. Leus N. F., Kolomiychuk S. G., Kalinin L. G. [et al.] Influence of microwave field on some chemical indicators of wheat and barley, *Storage and processing of grain*, **1**, 41 (2001).
11. Tepliakova T. Y. Soya, *B sp.: Theoretical bases of selection. Tom. III. Genofund and selection of cereal legumes (lupin, vik, soybean, beans)*, 196 (C-PB.: VIR, 1995).
12. Chuyan E. N., Temuryants N. A., Moskovchuk O. B. [et al.]. Physiological mechanisms of biological effects of low-intensity EMI HCH, *Simferopol: «Elinho» emergency*, 448 (2003).
13. Chuyan E. N., Temuryants N. A., Neuroendocrine mechanisms of action of low-intensity electromagnetic radiation of extreme frequency (part 1), *Millimeter waves in biology and medicine*, **2 (38)**, 3 (2005).
14. Balakai, G. T., Bezuglova O. S. Soya: ecology, agrotechnics, processing, *Rostov on Don: Phoenix*, 160 (2003).
15. Baranov V. F., Lukomets V. M. Soya, biology and cultivation technology, *Krasnodar*, 433 (2005).
16. Tretyakov N. N., Panichkin L. A., Kondratiev M. N., et. el. Workshop on plant physiology, *M.: ColosS*, 172 (2003).