

УДК 633.11:631.524.02

ЕДН KSJGIK

DOI 10.71453/3034-4174-2025-2-15



ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРОРОСТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Соболева Ольга Михайловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и вирусологии^{1, 2}

Белашова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, декан высшей аграрной школы¹

Харченко Елена Николаевна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Агроэкология»¹

¹Кузбасский государственный аграрный университет имени В.Н. Полецкого, г. Кемерово, Россия

²Кемеровский государственный медицинский университет, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Предпосевная обработка семян основных продовольственных культур с целью повышения их урожайности должна проводиться безопасными и эффективными методами, к которым относится и электромагнитная обработка сверхвысокой частоты. Интенсивность развития проростка определяется не только внешними факторами, но и зависит от эффективного функционирования фотосинтетического аппарата, что можно подтвердить косвенным путем по содержанию и соотношению между разными группами основных и вспомогательных фотосинтетических пигментов. В работе показано влияние предпосевной обработки семян электромагнитным полем сверхвысокой частоты на содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, а также их соотношение в семидневных проростках яровой мягкой пшеницы сортов Тризо и Новосибирская 31. Общее состояние фотосинтетического аппарата двух сортов яровой пшеницы на контрольном варианте одинаково. Однако ответная реакция на изучаемые режимы СВЧ-обработки носит индивидуальный характер. Так, лучшим режимом для накопления хлорофиллов и каротиноидов проростков пшеницы сорта Тризо признан средний режим мощности – 420 Вт. Для пшеницы сорта

Новосибирская все режимы СВЧ-обработки приводят к снижению содержания пигментов, но под действием электромагнитного поля увеличивается содержание каротиноидов, что можно рассматривать как адаптационный механизм защиты от стрессовых условий.

Ключевые слова: электромагнитное поле сверхвысокой частоты, СВЧ, предпосевная обработка, яровая пшеница, *Triticum aestivum* L., фотосинтетические пигменты, хлорофиллы, каротиноиды.

THE EFFECT OF AN ULTRAHIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE FORMATION OF THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF SPRING WHEAT SEEDLINGS

Soboleva Olga M., Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Microbiology and Virology^{1, 2}

Belashova Olga V., Candidate of Technical Sciences, Dean of the Higher Agricultural school¹

Kharchenko Elena N., Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher at the laboratory «Agroecology»¹

¹Kuzbass State Agrarian University, Kemerovo, Russia

²Kemerovsky State Medical University, Kemerovo, Russia

Abstract. Pre-sowing treatment of seeds of major food crops in order to increase their yield should be carried out using safe and effective methods, which include ultra-high frequency electromagnetic treatment. The intensity of seedling development is determined not only by external factors, but also depends on the effective functioning of the photosynthetic apparatus, which can be determined indirectly by the content and ratio between different groups of basic and auxiliary photosynthetic pigments. The paper shows the nature of the effect of pre-sowing seed treatment with an ultrahigh frequency electromagnetic field on the content of chlorophylls a and b, carotenoids, as well as their ratios in seven-day seedlings of spring soft wheat varieties Trizo and Novosibirskaya 31. The general condition of the photosynthetic apparatus of the two spring wheat varieties in the control variant is the same. However, the response to the studied microwave processing modes is individual. Thus, the average power mode of 420 watts is recognized as

the best mode for the accumulation of chlorophylls and carotenoids in wheat seedlings of the Trizo variety. For Novosibirskaya 31 variety of wheat, all microwave processing modes lead to a decrease in the pigment content. Under the influence of an electromagnetic field, the content of carotenoids increases, which can be considered as an adaptive protection mechanism against stressful conditions.

Keywords: ultrahigh frequency electromagnetic field, microwave, pre-sowing, spring wheat, *Triticum aestivum* L., photosynthetic pigments, chlorophylls, carotenoids.

Введение

Пшеница – одна из основных культур, используемых для производства продуктов питания и кормов в мире. В последние годы урожайность пшеницы растет благодаря генетическому совершенствованию сортов и более интенсивным методам ведения сельского хозяйства. Однако в связи с ожидаемым мировым спросом на продовольствие с 2010 по 2050 год, который по прогнозам увеличится примерно на 35–56% [1], существует высокая вероятность необходимости увеличить урожайность возделываемых продовольственных культур, таких как пшеница. Кроме того, опасения по поводу воздействия интенсивного сельского хозяйства на окружающую среду побудили к поиску более устойчивых альтернативных методов повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Создание и успешное использование сортов интенсивного типа, обладающих высоким потенциалом продуктивности, требуют как от исследователей, так и от товаропроизводителей глубокого понимания механизмов фотосинтетической деятельности на разных уровнях организации ассимиляционного аппарата [2]. Содержание фотосинтетических пигментов, а также их соотношение между разными группами – важный интегративный признак, позволяющий судить о достаточности эдафических условий произрастания растения, наличии стрессовых факторов различного происхождения, уровне продуктивности, культуре агротехники [3].

Предпосевная обработка семян является распространенным методом, используемым в современном сельском хозяйстве для повышения энергии прорастания, всхожести, повышения интенсивности роста в первые периоды развития проростка. В дальнейшем ранний старт дает большие преимущества по силе роста и формированию урожая. В качестве методов предпосевной

обработки рекомендуется использовать экологически чистые, энерго- и экономически эффективные методы, к которым относится и электромагнитное поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Данный тип электрофизической обработки, ее влияние на рост сельскохозяйственных растений и их качественные показатели в последние годы вызывают стабильный интерес исследователей в области растениеводства. Контролируемые и подходящие дозы электромагнитного излучения могут принести пользу растению [4], позволяя ему более полно раскрыть генетический потенциал продуктивности и устойчивости к неблагоприятным факторам.

В связи с вышесказанным поставлена **цель** – изучить особенности влияния электромагнитного поля сверхвысокой частоты на содержание и соотношение фотосинтетических пигментов проростков пшеницы.

Материалы и методы

Объектом исследования служили семена яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) двух сортов: среднепозднего Тризо и среднераннего Новосибирская 31. Исследование проводили в Кузбасском государственном аграрном университете имени В.Н. Полецкого в 2024 г. Семена обрабатывались на технологической линии «Волна 100» от ООО «ЭкоМашСервис» (Россия). «Волна 100» позволяет за 90 с провести эффективную обработку различных, в том числе фуражных, материалов.

Схема эксперимента включала сочетание трех режимов мощности СВЧ и трех вариантов экспозиции, т.е. следующие варианты обработки:

1. Контроль, без обработки;
2. ЭМП СВЧ 0,14 кВт, 1 с;
3. ЭМП СВЧ 0,14 кВт, 11 с;
4. ЭМП СВЧ 0,14 кВт, 21 с;
- 5–7. ЭМП СВЧ 0,42 кВт, те же экспозиции;
- 8–10. ЭМП СВЧ 0,70 кВт, те же экспозиции.

После обработки ЭМП СВЧ сухих семян они проращивались на увлажненной фильтровальной бумаге в чашках Петри по 100 семян в трехкратной повторности. Для экстракции фотосинтетических пигментов брали листья семидневных растений. Количественная оценка содержания пигментов проведена фотометрическим методом [5], позволяющим получить данные о содержании хлорофилла а и b без предварительного выделения их

из суммарной ацетоновой вытяжки. Для определения содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, суммы каротиноидов) надземную часть растений взвешивали, навески образцов массой 0,100 г тщательно растирали пестиком в фарфоровой ступке с небольшим количеством 100%-ного ацетона (2–3 мл). После настаивания (2–3 мин) экстракт переносили на стеклянный фильтр и фильтровали в колбу Бунзена, соединенную с вакуумным насосом. Экстракцию пигментов небольшими порциями чистого растворителя повторяли на фильтре 3–4 раза до полного извлечения пигментов. Оптическую плотность полученных вытяжек определяли на фотоэлектрическом фотометре КФК-3-01 (Россия) при следующих длинах волн: 440,5; 644 и 662 нм. Концентрацию пигментов рассчитывали по уравнениям для 100%-ного ацетона. После установления концентрации пигмента в вытяжке определяли его содержание с учетом объема вытяжки и веса пробы.

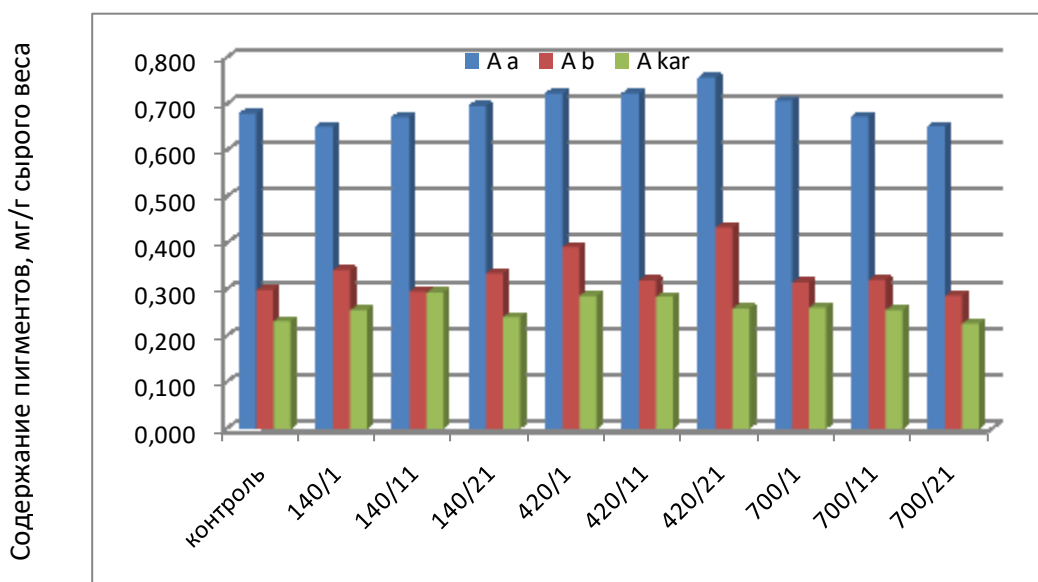
Все измерения проведены в трехкратной аналитической повторности; на диаграммах приведены средние значения. Достоверность отличий по сравнению с контролем находили по F-критерию при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты

Содержание фотосинтетических пигментов в семисуточных ростках контрольного варианта яровой мягкой пшеницы сорта Тризо (рис. 1) составило: хлорофилл *a* – 0,679 мг/г сырого веса, хлорофилл *b* – 0,299, каротиноиды – 0,231 мг/г сырого веса. Количественные колебания тех или иных пигментов, которые отмечаются после СВЧ-обработки, разнонаправлены и зависят от сочетаний мощности и экспозиции конкретного режима.

Такие варианты воздействия ЭМП, как 140 Вт/21 с, 420 Вт/1 с, 420 Вт/11 с, 420 Вт/21 с и 700 Вт/1 с, оказались благоприятными для проростков и привели к стимуляции синтеза хлорофилла *a* – его содержание по показателям колеблется от 0,696 мг/г сырого веса до 0,757 мг/г сырого веса, т.е. относительно контроля превышение составляет от 2,5 до 11,49%. Для хлорофилла *b* набор эффективных режимов СВЧ-обработки расширен и включает в себя семь режимов; колебания показателя находятся в диапазоне от 0,315 мг/г сырого веса до 0,433 мг/г сырого веса, т.е., соответственно, прибавка составляет от 5,35 до 44,82%.

При действии ЭМП СВЧ отмечено увеличение концентрации каротиноидов, что свидетельствует об адаптации растений к действию электрофизического фактора: каротиноиды выступают в качестве ловушки АФК, защищая хлорофилл от повреждения [6]. Физическая обработка семян микроволновым излучением на частоте 2,45 ГГц в течение короткого времени оказывает стимулирующее воздействие на прорастание семян, рост всходов и накопление биомассы у различных зерновых культур, таких как ячмень, рис и пшеница [цит. по: 4]. Повышенные относительно необработанного зерна значения содержания каротиноидов колеблются от 0,240 мг/г сырого веса до 0,293 мг/г сырого веса, т.е. относительные прибавки к контролю составляют от 3,90 до 26,84%, что свидетельствует об адаптации растений.



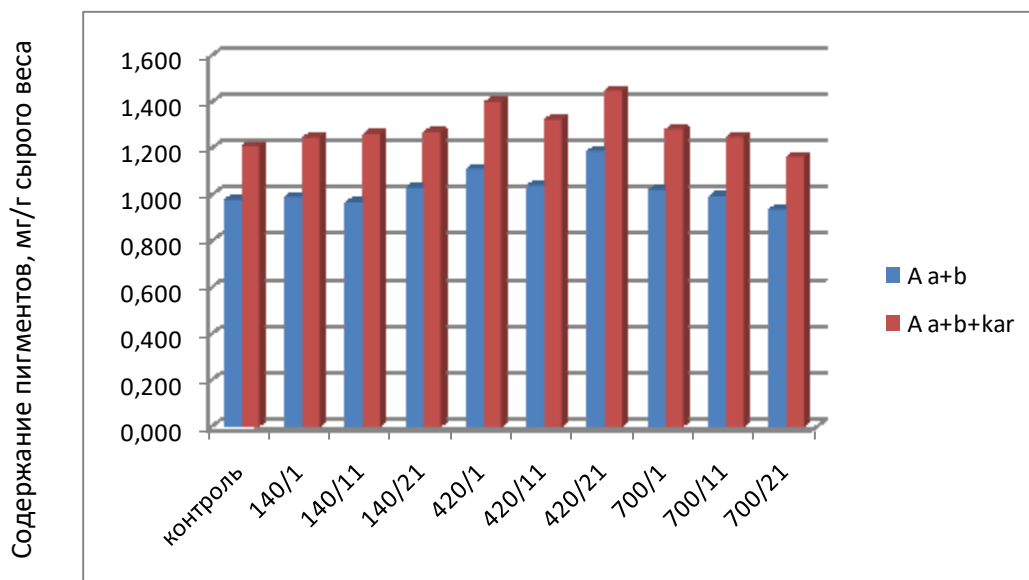
Примечание: здесь и далее A_a – содержание хлорофилла а, A_b – содержание хлорофилла b, A_{kar} – содержание каротиноидов.

Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов в ростках яровой пшеницы сорта Тризо после СВЧ-обработки, мг/г сырого веса

Полученные данные согласуются с результатами других исследователей: сообщается, что предпосевная СВЧ-обработка значительно снижает последствия стресса у семидневных проростков пшеницы, обработанных хлоридом кадмия [7]. Данный факт авторы объясняют тем, что СВЧ-волны влияют на жирнокислотный состав [8] и содержание алифатических спиртов [9], повышают активность антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, пероксидазы, каталазы, аскорбатпероксидазы и глутатионредуктазы), а также концентрацию

антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, восстановленного глутатиона, каротиноидов и оксида азота). Основной механизм повышения всхожести семян связан с тепловыми и нетепловыми «электромагнитными» эффектами ЭМП СВЧ, которые повышают излучение биофотонов, температуру поверхности и внутреннего пространства, интенсивность магнитного поля семян. Все вместе это приводит к повышению активности ферментов семядолей, таких как амилаза и протеиназа [цит. по: 4]. Другими словами, ЭМП СВЧ увеличивает внутреннюю энергию семян, что ускоряет ряд физиологических и биохимических процессов прорастания и приводит к увеличению скорости прорастания и роста проростков.

В работе [10] было определено, что разные режимы ЭМП СВЧ оказывают различное влияние на те или иные параметры развивающихся растений. Настоящее исследование согласуется с этими выводами. Анализ полученных данных (рис. 2) свидетельствует, что для накопления как суммы хлорофиллов, так и пигментов всех трех исследуемых групп, благоприятны два режима СВЧ-воздействия – 420 Вт/1 с и 420 Вт/21 с – по сравнению с контрольными значениями превышение составило, соответственно, 13,80 и 21,68% (для суммы зеленых пигментов); 15,72 и 19,85% (для суммы всех фотосинтетических пигментов).



Примечание: здесь и далее Aa+b – сумма зеленых пигментов, Aa+b+kar – сумма всех фотосинтетических пигментов.

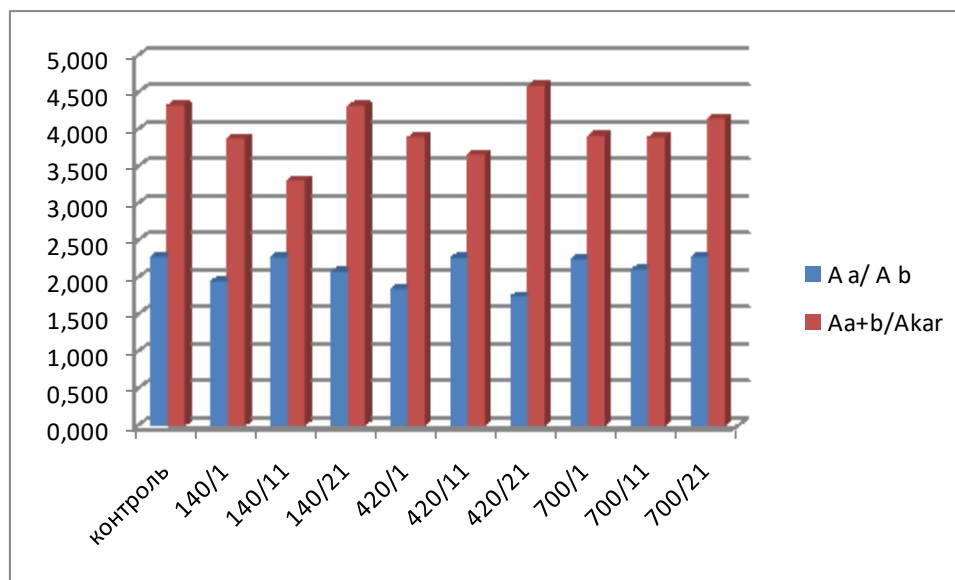
Рис. 2. Сумма хлорофиллов и каротиноидов в ростках яровой пшеницы сорта Тризо после СВЧ-обработки, мг/г сырого веса

Наши данные согласуются с данными других исследователей: в работе [11] отмечается, что ЭМП СВЧ влияет на фотосинтетическую активность растений, выращенных из обработанных семян.

Соотношения между разными группами ассимиляционных пигментов растений характеризуют общее состояние их фотосинтетического аппарата, а также свидетельствуют о неоптимальных условиях произрастания, действии неблагоприятных биотических и абиотических факторов и т.д.

Изменение баланса в соотношениях фотосинтетических пигментов может служить индикатором нарушения метаболизма растительного организма. Так, при превышении содержания хлорофилла *a* над содержанием хлорофилла *b* интенсивность фотосинтеза растет [12]. Низкие значения отношения суммы зеленых пигментов к сумме желтых пигментов свидетельствуют о дисбалансе между основной и вспомогательной формами пигментов [13].

Отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам играет важную роль при характеристике работы фотосинтетического аппарата. Это соотношение в норме стабильно и очень чутко реагирует на изменения различных факторов среды. Уменьшение значений этого показателя говорит о снижении светособирающей функции пигментного комплекса.



Примечание: здесь и далее A_a/A_b – отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b*, A_{a+b}/A_{kar} – отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых пигментов.

Рис. 3. Соотношение фотосинтетических пигментов в ростках яровой пшеницы сорта Тризо после СВЧ-обработки

Наиболее низкое значение отношения суммы зеленых пигментов к сумме желтых зафиксировано на варианте СВЧ-обработки 140 Вт/11 с и составляет 3,314 (рис. 3).

Общий разброс показателей отношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* находится в диапазоне 1,747–2,277, отношения суммы хлорофиллов к каротиноидам – 3,314–4,593. Причем максимальное отношение двух форм хлорофилла между собой зарегистрировано как на контрольном варианте, так и при максимальном режиме СВЧ-обработки – 700 Вт/21 с.

В сравнении с данными для пшеницы сорта Тризо, содержание основных фотосинтетических пигментов в ростках необработанного образца зерна пшеницы сорта Новосибирская 31 отличается (рис. 4): содержание хлорофилла *a* (0,708 мг/г сырого веса) и каротиноидов (0,286 мг/г сырого веса) несколько выше, однако количество хлорофилла *b* весьма близко (0,290 мг/г сырого веса) к содержанию каротиноидов.

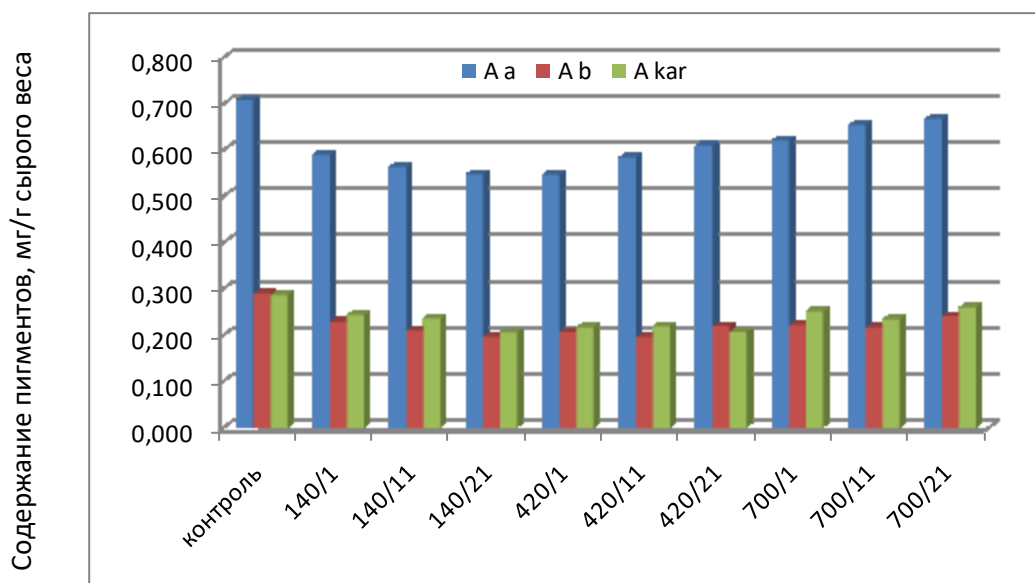


Рис. 4. Содержание фотосинтетических пигментов в ростках яровой пшеницы сорта Новосибирская 31 после СВЧ-обработки, мг/г сырого веса

Проведенная предпосевная СВЧ-обработка привела к снижению содержания основных фотосинтетических пигментов в ростках пшеницы сорта Новосибирская 31. Максимальное снижение по сравнению с контрольными значениями для хлорофилла *a* отмечается на уровне 22,60–22,88% (140 Вт/21 с и 420 Вт/1 с), для хлорофилла *b* – 32,41% (140 Вт/21 с и 420 Вт/11 с), для каротиноидов – 27,97% (140 Вт/21 с и 420 Вт/21 с).

Таким образом, режим СВЧ-воздействия 140 Вт/21 с отрицательно повлиял на накопление всех трех групп пигментов. Данный факт можно объяснить слишком длительной экспозицией – 21 секунда, которая оказывается чрезмерной для жизнедеятельности зерновки и последующего ее развития.

При сравнении графиков суммарного содержания фотосинтетических пигментов в необработанных ростках яровой пшеницы сортов Тризо и Новосибирская 31 (рис. 2 и 5) обнаружено, что количество зеленых пигментов примерно одинаковое, разница составила около 2% (0,978 мг/г сырого веса и 0,998 мг/г сырого веса), в то время как общая сумма всех пигментов фотосинтеза различается уже на 6% (1,209 мг/г сырого веса и 1,284 мг/г сырого веса).

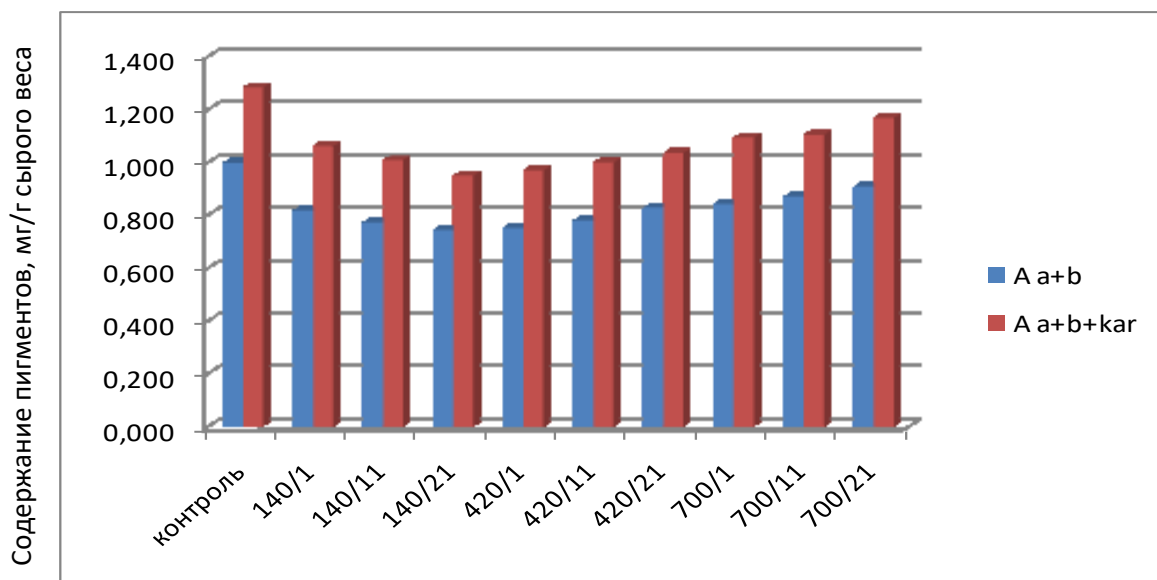


Рис. 5. Сумма хлорофиллов и каротиноидов в ростках яровой пшеницы сорта Новосибирская 31 после СВЧ-обработки, мг/г сырого веса

Соотношение разных форм хлорофилла колеблется от 2,444 (контроль) до 3,028 (700 Вт/11 с) (рис. 6). Относительно стабильные и высокие величины отношения зеленых пигментов к желтым, находящиеся в пределах от 3,274 (140 Вт/21 сек.) до 4,005 (420 Вт/21 сек.), показывают, что развивающиеся проростки пшеницы не испытывают особого стресса от проведенной предпосевной СВЧ-обработки.

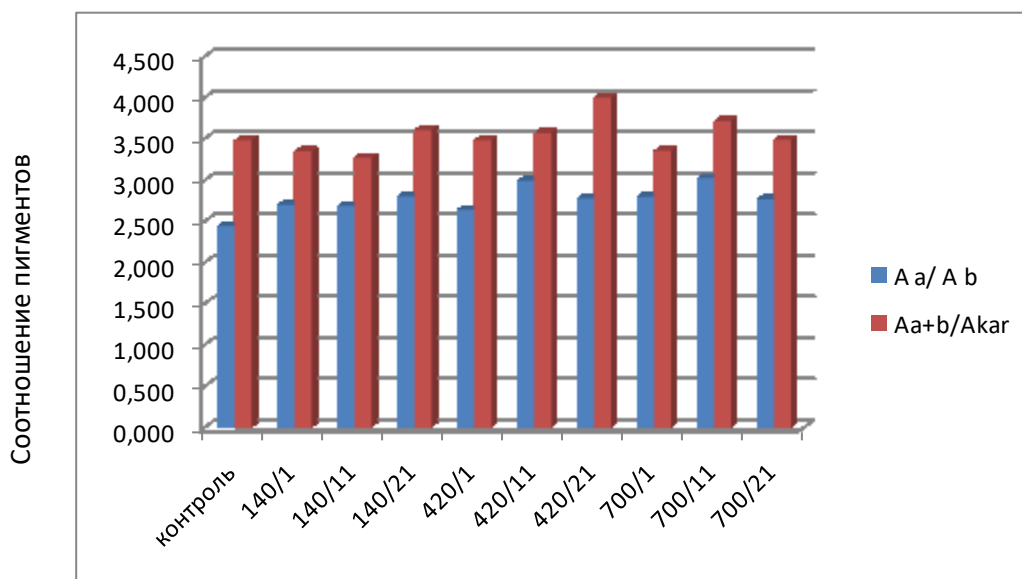


Рис. 6. Соотношение фотосинтетических пигментов в ростках яровой пшеницы сорта Новосибирская 31 после СВЧ-обработки

Закключение. Общее состояние фотосинтетического аппарата двух сортов яровой пшеницы при отсутствии влияния электромагнитного поля СВЧ практически одинаково, что объясняется единым происхождением растений и принадлежностью к одному биологическому виду. Однако ответная реакция на изучаемые режимы СВЧ-обработки носит индивидуальный – сортовой – характер. Так, по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в зеленой массе проростков для пшеницы сорта Тризо выделяется средний режим мощности – 420 Вт. Однако для пшеницы сорта Новосибирская 31 не представляется возможным выделить какой-либо один из опытных вариантов, т.к. все они приводят к снижению содержания пигментов. Под действием ЭМП СВЧ увеличивается содержание каротиноидов, что можно рассматривать как адаптационный механизм защиты от стрессовых условий.

Список источников

1. Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., Saghai, Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050 / M. Van Dijk, T. Morley, M. L. Rau, Y. Saghai // Nature Food. 2021. Vol. 2, Is. 7. Pp. 494–501.
2. Calzadilla, P. I. Assessing photosynthesis in plant systems: A cornerstone to aid in the selection of resistant and productive crops / P. I. Calzadilla, F. E. L. Carvalho, R. Gomez, S. Signorelli // Environmental and Experimental

- Botany. 2022. Vol. 201, Is. 19. P. 104950. DOI 10.1016/j.envexpbot.2022.104950.
3. Kiriziy, D. Effects of drought, high temperature and their combinations on the photosynthetic apparatus and plant productivity / D. Kiriziy, A. Kedruk, O. Stasik // Regulation of Adaptive Responses in Plants. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2024. Pp. 1–32. <https://doi.org/10.52305/TXQB2084>.
 4. Ayesha, S. Enhancing sustainable plant production and food security: Understanding the mechanisms and impacts of electromagnetic fields / S. Ayesha, Z. Abideen, G. Haider, F. Zulfiqar // Plant Stress. 2023. Vol. 9. P. 100198. DOI:10.1016/j.stress.2023.100198.
 5. Гавриленко, В. Ф. Большой практикум по фотосинтезу / В. Ф. Гавриленко, Т. В. Жигалова. Москва : Академия, 2003. 256 с.
 6. Wang, P. Reactive oxygen species: multidimensional regulators of plant adaptation to abiotic stress and development / P. Wang, W.-C. Liu, C. Han, S. Wang // Journal of Integrative Plant Biology. 2024. Vol. 66, Is. 3. Pp. 330–367. DOI 10.1111/jipb.13601.
 7. Qiu, Z. B. Microwave pretreatment can enhance tolerance of wheat seedlings to CdCl₂ stress / Z. B. Qiu, J. T. Li, Y. Zhang, Z. Z. Bi et al. // Ecotoxicology and environmental safety. 2011. Vol. 74, Is. 4. Pp. 820–825. DOI 10.1016/j.ecoenv.2010.11.008.
 8. Kondratenko, E. P. Stress Protective Role of Long Chain Fatty Acids in Barley Springs under the Action of Electromagnetic Field of Extreme High Frequency / E. P. Kondratenko, O. M. Soboleva, A. S. Sukhikh, I. A. Sergeeva et. al. // Modern S&T Equipments and Problems in Agriculture. Kemerovo, 25.06.2020 Кемерово : Кузбасская ГСХА, 2020. Pp. 127–139.
 9. Соболева, О. М. Изменения содержания алифатических спиртов в проростках ячменя под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты / О. М. Соболева, Е. П. Кондратенко, А. С. Сухих и др. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2020. № 3(31). С. 3–13. DOI 10.21685/2307-9150-2020-3-1.
 10. Соболева, О. М. Вклад органов проростка ячменя в формирование ответной реакции на действие СВЧ-стрессора / О. М. Соболева, Е. П. Кондратенко, А. С. Сухих // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2022. № 1. С. 38–44.
 11. Французов, С.В. Пути повышения полевой всхожести семян и формирование урожайности зерна проса обыкновенного в условиях

- Оренбургской области : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / С. В. Французов. Оренбург, 2002. 19 с.
12. Umesh, M. R. Shade tolerance response of legumes in terms of biomass accumulation, leaf photosynthesis, and chlorophyll pigment under reduced sunlight / M. R. Umesh, S. Angadi, S. Begna, P.H. Gowda et al. // Crop Science. 2022. Vol. 63, Is. 1. Pp. 278–292. DOI 10.1002/csc2.20851.
13. Соболева, О. М. Изменение пигментного состава листьев ячменя при адаптации к водному дефициту после СВЧ-обработки / О. М. Соболева, О. В. Белашова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 2(244). С. 17–22.