

## СИНТЕЗ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРОРОСТКОВ ЯЧМЕНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

О. М. Соболева<sup>1,2</sup>, Е. П. Кондратенко<sup>1</sup>, А. С. Сухих<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет» Минздрава РФ

Поступила в редакцию 22.11.2021 г

**Аннотация.** Фенольные соединения оказывают защитное действие относительно органо-тканевого строения растительного организма и снижают негативное воздействие ультрафиолетового излучения, могут выполнять функции природных антибиотиков, а также определяют цвет и вкус зерна и продуктов его переработки. Фенольные вещества участвуют в процессах роста, морфогенеза, дыхания и фотосинтеза, являются резервными и сигнальными веществами, обладают антиоксидантными свойствами. **Цель** – изучить характер количественных и качественных изменений содержания фенольных веществ в разных анатомических частях проростков ячменя при действии электромагнитного излучения сверхвысокой частоты.

Для определения влияния электромагнитного излучения сверхвысокой частоты на содержание веществ фенольной природы с антиоксидантными свойствами в органах проростков использовали яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Никита. Схема эксперимента включала два режима: 1. Контроль, без обработки; 2. СВЧ-обработка: мощность 0.42 кВт, частота магнетрона 2.45 МГц, экспозиция 11 сек. В семидневных проростках проводили определение фенольных веществ с помощью ОФ ВЭЖХ анализа с амперометрическим детектором.

Максимальное число фенольных соединений зарегистрировано в хлороформном экстракте эндосперма СВЧ-обработанного зерна, их число составляет 26 наименований веществ. Минимальное число индивидуальных веществ составляет 10-11 и обнаружено в образцах корней и ростков нативных проростков, а также корней СВЧ-облученных растений ячменя. СВЧ-обработка сказалась как на числе выделенных веществ, так и повлияла на их количество в экстракте. Наиболее активной в биохимическом отношении анатомической частью семидневного проростка ячменя является эндосперм: в нем содержится значительно больше веществ фенольной природы, зафиксированных амперометрическим детектором, чем в ростках и корнях. СВЧ-излучение существенно повлияло на количество фенольных соединений с антиоксидантными свойствами в составе эндосперма.

В отношении фенольных веществ в составе проростков ячменя существует органоспецифическая ответная реакция, что выражается в разнице их количественного и качественного содержания. Отдельные фенольные вещества регистрируются во всех органах проростка (корни, листья, эндосперм), а некоторые имеют определенную локализацию. Общее количество фенольных веществ с антиоксидантными свойствами увеличивается после СВЧ-обработки. Полученные данные позволяют рекомендовать изученный режим СВЧ-обработки (420 Вт, 11 сек.) для предварительной обработки семян ячменя с целью включения их в состав пищевых и кормовых продуктов функциональной направленности и повышенного содержания антиоксидантных компонентов.

**Ключевые слова:** ячмень; *Hordeum vulgare*; фенольные вещества; антиоксидантные свойства; электромагнитное излучение сверхвысокой частоты, проростки, «микрозелень».

В настоящее время в растительном мире насчитывают около нескольких десятков тысяч фенольных соединений, которые хотя и опосредованно влияют на первичные метаболические процессы и относятся к группе «вторичные

метаболиты», тем не менее, являются жизненно важными для растений. В отличие от других вторичных метаболитов, растительные фенолы характеризуются универсальностью своего природного распространения, встречаясь практически во всех клетках. В зависимости от структуры, фенольные соединения имеют разную биологи-

ческую активность и ключевое физиологическое значение для растительного организма [1]. В первую очередь, фенольные соединения оказывают протекторное действие относительно органо-тканевого строения растительного организма и нивелируют негативное воздействие ультрафиолетового излучения, могут выполнять функции природных антибиотиков, а также определяют цвет и вкус зерна и продуктов его переработки [2]. Также отмечается, что они участвуют в процессах роста, морфогенеза, дыхания и фотосинтеза, являются резервными и сигнальными веществами, обладают антиоксидантными свойствами.

Фенольные соединения являются вторичными метаболитами, образующимися естественным путем во время набухания и прорастания семени [3]. Они синтезируются как во время нормального роста и развития [4], так и являются маркерами стрессоров [5], таких как высокая температура [6], засоление [7], действие тяжелых металлов [8], УФ-облучение [9] и другие. Влияют на содержание фенольных соединений и различные физические факторы. Микроволновое излучение [10], магнитные поля [11] и электрические поля могут оказывать определенное воздействие на ткани растений [12], регулируя тем самым процессы прорастания и роста [13]. Электромагнитное излучение сверхвысокой частоты (ЭМИ СВЧ) может способствовать прорастанию семян и повышать содержание биологически активных компонентов [14]. Растение может поглощать электромагнитную энергию и изменять структуру клеточных макромолекул за счет влияния на их физиологические и биохимические характеристики [12]. Электромагнитная энергия влияет на содержание фенольных соединений и других вторичных метаболитов [15, 16], а также на количество флавоноидов, растворимого белка, сахара в растении, свободных аминокислот [17], оказывает позитивное влияние на активность каталазы и супероксиддисмутазы [13], значительно увеличивает содержание ГАМК. Эти данные указывают на то, что микроволны могут стимулировать синтез этих метаболитов и питательную ценность ростков и зерен, а также улучшить качество проросшего зерна [18].

С другой стороны, доказано, что СВЧ-обработка вызывает в растениях выработку активных форм кислорода (АФК) [19], что сопровождается защитными реакциями в виде усиления синтеза или активации антиоксидантных соединений. К последним относятся и фенольные вещества, т.к. они обладают такими свойствами,

как поглощение и ингибирование активных форм кислорода, электрофильное поглощение и хелатирование металлов. Фенольные гидроксильные группы являются хорошими донорами водорода и могут вступать в реакцию с кислородными и азотными видами органических радикалов. Благодаря своим антиоксидантным свойствам, фенольные соединения растений полезны при диабете, сердечно-сосудистых и нейродегенеративных заболеваниях, мутагенезе и канцерогенезе, происходящих в организме человека [20].

В неблагоприятных условиях для контроля уровня активных форм кислорода и защиты клеток растительные ткани могут продуцировать различные нейтрализующие вещества [21], такие как антиоксидантные ферменты и фенольные соединения. При синергетическом действии этих веществ свободные радикалы и окислительные интермедиаты, генерируемые в процессе метаболизма растений, могут быть быстро элиминированы [22]. Жесткие режимы обработки – высокая мощность и длительное время воздействия СВЧ-излучения – могут инактивировать ферменты в семенах [23] и модулировать уровень экспрессии генов [24]. После микроволновой обработки семян содержание рутина в проростках увеличивалось в геометрической прогрессии, а антиоксидантная активность значительно улучшалась [25]. Микроволновое излучение может усилить способность к элиминации свободных радикалов проростков пшеницы [26] и значительно повысить активность антиоксидантных ферментов в семенах [27]. Биологический эффект воздействия СВЧ значительно увеличивает общее содержание фенольных веществ и флавоноидов, усиливает антиоксидантный механизм защиты проростков. Оптимальный режим СВЧ-обработки может повысить активность антиоксидантных ферментов в ростках растений [28]. Изменение содержания соединений фенольной природы подтверждает мнение, что ЭМИ может являться малым стрессовым фактором, а реакции, развивающиеся в обработанных растениях, можно рассматривать как фазы фитостресса [5]. СВЧ-обработка семян сорго может способствовать улучшению их состава в отношении фенольного профиля, антиоксидантной активности и переваримости белка *in vitro* проростков, что делает их ценным ингредиентом для включения в состав функциональных продуктов питания [28].

В последнее время проростки злаков все чаще используются как компоненты функциональных продуктов питания в связи с их здоровьесберега-

ющим эффектом и высокой питательной ценностью. Биохимический состав проростков включает аминокислоты, клетчатку, микроэлементы, витамины, флавоноиды и фенольные вещества [29, 30]. Злаковые проростки, выращиваемые до 1-2-недельного возраста, также называемые «микрозеленью» (microgreen) [4], все чаще используются в качестве натуральных добавок для улучшения здоровья [31]. Среди «микрозелени» злаков особое внимание уделяется ячменю. Термин «зеленый ячмень» в литературе используется для описания проростков ячменя, растущих до 200 ч от всходов и достигающих около 20-30 см в высоту [32]. Другие используемые термины – молодой ячмень, побеги ячменя или трава ячменя [33].

Влияние сверхвысокочастотного электромагнитного излучения на растения изучается исследователями из разных стран уже довольно давно [34]. Механизм его действия до конца еще не изучен, но уже установлено, что активация антиоксидантной системы растений, включающей низкомолекулярные и высокомолекулярные компоненты, происходит при воздействии СВЧ-энергии. Поэтому изучение состояния этой системы, а также низкомолекулярных антиоксидантов как компонентов этой системы, важно для понимания механизма взаимодействия ЭМИ СВЧ с растениями. В связи с этим поставлена цель – изучить характер количественных и качественных изменений содержания фенольных веществ в разных анатомических частях проростков ячменя при действии электромагнитного излучения сверхвысокой частоты.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения влияния ЭМИ СВЧ на содержание веществ фенольной природы с антиоксидантными свойствами в органах проростков использовали яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Никита репродукции 2019 г.

Схема эксперимента включала два режима:

1. Контроль, без обработки. Необработанные образцы семян находились в разных помещениях со сходными условиями освещения, влажности и температуры воздуха.

2. Обработка на СВЧ-установке «Волна-100» («Экомашсервис», Россия): мощность 0.42 кВт, частота магнетрона 2.45 МГц, экспозиция 11 сек. Данный режим выбран на основе предварительно проведенных исследований, в ходе которых изучалась как всхожесть семян, так и морфометрические показатели развивающихся

проростков (длина листьев и корней, число корней, сырая и сухая масса листьев и корней). По стимуляции всей совокупности изученных показателей выделился данный режим.

Выходная мощность СВЧ-излучения измерялась по методу Zhang, Bi, Liu [35] с использованием формулы:

$$Q_{abs} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{t}$$

где  $Q_{abs}$  – мощность, поглощаемая водой в единицу времени (Вт),  $m$  – масса воды (г);  $c_p$  – удельная теплоемкость воды (кДж/кг · °С),  $\Delta T$  – повышение температуры в водной нагрузке (°С),  $t$  – время включения магнетрона (сек.).

Воздушно-сухие семена ячменя обрабатывались при заданных режимах, затем проращивались в водной культуре в чашках Петри на стерильных дисках фильтровальной бумаги. Проращивание проводили при неконтролируемой температуре (в среднем 18°С) и относительной влажности воздуха (в среднем 60%). Комната была подвержена суточному циклу с колебаниями температуры, влажности и освещенности. Проростки ячменя выращивали в лаборатории при дневном свете, но без прямых солнечных лучей, для лучшего роста. Для оценки воспроизводимости результатов исследование проводилось в двух блоках с промежутком между блоками 15 дней. По достижении проростками возраста 7 дней проводили хроматографирование.

Предварительная пробоподготовка к анализу включала в себя ряд операций: измельчение в агатовой ступке навески 2.0 г (точная навеска) свежего материала, разделенного на отдельные анатомические части (корни, ростки и эндосперм с неотделенной оболочкой); трехкратное экстрагирование трихлорметаном объемом 3 мл; обработка экстракта в ванне ультразвуковой WUC-A03H («Daihan Scientific», (Ю. Корея) частотой 40 кГц в течение 10 мин. для полноты извлечения веществ; отстаивание в течение 15 мин.; фильтрация через бумажный фильтр.; сушка на воздухе под тягой; обработка в 10%-ной трихлоруксусной кислоте объемом 5 мл, энергичное ручное встряхивание в течение 5 мин.; подогрев на водяной бане при 90°С в течение 30 мин.; остывание до температуры 25°С; центрифугирование при 5000 об./мин. в течение 5 мин.; декантирование; добавление концентрированного изопропилового спирта объемом 5 мл. Затем органическую фазу упаривали досуха в инертной среде, и количественно растворяли в 2 мл подвижной фазы.

ОФ ВЭЖХ анализ выполнен на приборе ВЭЖ-хроматографе «Цвет Яуза-04» с амперометрическим детектором («Химавтоматика», Россия). Управление прибором и обработка полученных результатов осуществлялись с использованием программного обеспечения МультиХром, версия 3.1.1550 («Амперсенд», Россия). В работе использована хроматографическая колонка: Gemini 5 мкм C18, 110А, 250 x 4.6 мм («Phenomenex», США). Предколонка Security Guard – с картриджем Gemini C18 4 x 3 мм. Объем петли 20 мкл. Скорость потока 1 мл/мин., давление  $45.5 \pm 1$  bar. Компоненты подвижной фазы, состоящей из ацетонитрила и бидистиллированной воды, смешивались в объемном соотношении (70:30), после этого проводилась дегазация с использованием вакуум-аспиратора в течение 15 мин. Режим элюирования изократический.

Идентификацию индивидуальных соединений проводили на основе соответствия временам удерживания и УФ-спектрам стандартных образцов. Методом внутренней нормализации определено относительное содержание отдельных идентифицированных фенольных веществ в исследуемом образце.

Все измерения проведены в двухкратной биологической и трехкратной аналитической повторностях; в таблицах приведены среднearифметические значения и ошибки средних величин. Полученные результаты обработаны статистически – достоверность отличий по сравнению с контролем находили по F-критерию при уровне значимости 0.05 и обозначены \*.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемый физический фактор – электромагнитное излучение сверхвысокой частоты – запускает при прорастании семян и развитии растений комплекс биохимических процессов, завершающихся образованием разнообразных фенольных соединений. Использование амперометрического детектора позволяет осуществить селективное выделение фенольных кислот с антиоксидантными свойствами [36]. Максимальные колебания уровня фенольных веществ отмечаются на начальных этапах онтогенеза и являются видо- и сортоспецифичными [5], что выявлено и в нашей работе. Изменение количества наименований выделенных в ходе хроматографического анализа веществ свидетельствует о развитии ответной реакции проростков ячменя на ЭМИ СВЧ.

Число выделенных веществ различается в зависимости от локализации в том или ином анатомическом образовании растения (рис. 1). Максимальное число соединений зарегистрировано в хлороформном экстракте остатков зерновки (в дальнейшем, для краткости будем обозначать «зерновка») СВЧ-обработанных растений, их число составляет 26 наименований. Минимальное число индивидуальных веществ составляет 10-11 и обнаружено в образцах корней и листьев контрольных растений, а также корней СВЧ-облученных растений ячменя. СВЧ-обработка сказалась как на числе выделенных веществ, так и повлияла на их количество в экстракте.

По характеристикам выделяемых фенольных соединений обнаружено несколько общих тенденций. Так, активно растущие анатомические части ячменя (корни и листья) характеризуются относительно коротким временем удерживания основной массы изучаемых веществ – временной диапозон измерения и выхода на плато заканчивается на 8-й минуте и на 13-й минуте, соответственно. Для «зерновки» время обработки результатов пришлось увеличить до 18-19 минут.

Вид кривой элюирования образцов также своеобразен, что зависит не только от органа, но и от режима обработки. Так, для хлороформных экстрактов листьев и «зерновки» характерно снижение величины сигнала на вариантах с СВЧ-облучением, что свидетельствует об относительном уменьшении концентрации доминирующих соединений по сравнению с необлученными растениями.

Наиболее контрастная картина изменений наблюдается при анализе хлороформного экстракта листьев ячменя (рис. 1, поз. 1). Здесь в полной мере проявился биотропный эффект ЭМИ. Значительно меняется число выделяемых фенольных компонентов: с 11 в контрольном варианте до 19 – в опытном, после СВЧ-обработки, а также их количественное содержание.

В таблице 1 приведены расчетные результаты по содержанию отдельных представителей фенольных соединений, выделенных из хлороформного экстракта листьев ячменя и идентифицированных. Наиболее существенная разница между двумя изучаемыми образцами зафиксирована для сиреновой кислоты в «зерновке» и проявляется в увеличении в 19.7 раза относительно контроля. Для большинства идентифицированных фенольных соединений зафиксировано увеличение количества по сравнению с необработанными растениями.

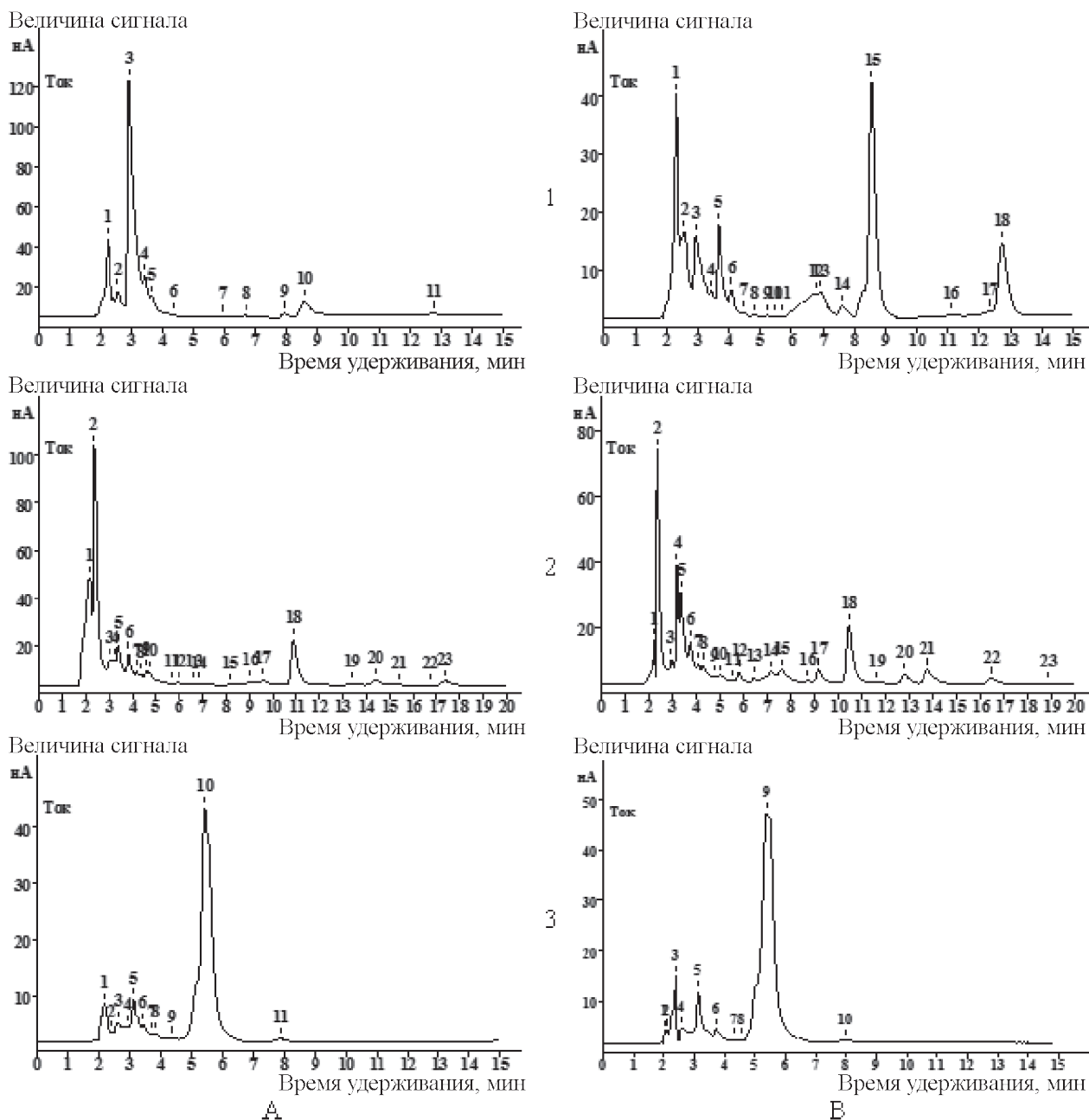


Рис. 1. Хроматографический профиль хлороформного экстракта проростков ячменя: нативных образцов (А) и после СВЧ-обработки при 420 Вт / 11 сек. (В); 1 – ВЭЖХ-хроматограмма хлороформного экстракта листьев; 2 – ВЭЖХ-хроматограмма хлороформного экстракта «зерновки»; 3 – ВЭЖХ-хроматограмма хлороформного экстракта корней.

Таблица 1

Результаты ВЭЖХ анализа хлороформного экстракта ячменя, %

№	Вещество	Листья		«Зерновка»		Корни	
		контроль	420 Вт / 11 сек	контроль	420 Вт / 11 сек	контроль	420 Вт / 11 сек
1	Кофейная кислота	5.21 ± 0.34	10.17* ± 0.87	33.90 ± 2.43	24.21* ± 1.93	2.83 ± 0.26	2.21 ± 0.21
2	Феруловая кислота	4.97 ± 0.13	7.49* ± 0.66	4.90 ± 0.42	6.04* ± 0.57	0.72 ± 0.06	2.75* ± 0.18
3	Ванилиновая кислота	1.40 ± 0.09	6.01* ± 0.59	0.30 ± 0.02	0.93* ± 0.08	–	–
4	Галловая кислота	7.67 ± 0.54	27.68* ± 1.98	–	0.67 ± 0.06	–	–
5	Кумаровая кислота	–	0.17 ± 0.01	–	2.17 ± 0.19	–	–
6	Сиреневая кислота	–	–	0.07 ± 0.01	1.38* ± 0.11	–	–
7	Салициловая кислота	–	–	–	0.99 ± 0.08	–	–
	Сумма	19.25	51.52	39.17	36.42	3.55	4.96

В листьях контрольных растений ячменя около половины всех идентифицированных фенольных кислот составляет галловая кислота с содержанием 7.67%, а также существенную долю составляет кофейная (5.21%). Тенденция сохраняется и в СВЧ-обработанных растениях, однако содержание указанных кислот становится равным 27.68% и 10,17%, соответственно, т.е. их содержание увеличивается в 3.6 и 2.0 раза.

Наиболее активной в биохимическом отношении анатомической частью семидневного растения ячменя является «зерновка»: в ней содержится значительно больше веществ фенольной природы, зафиксированных амперометрическим детектором, чем в листьях и корнях (рис. 1, поз. 2, 3). СВЧ-излучение существенно повлияло на количество фенольных соединений с антиоксидантными свойствами в составе «зерновки». Общее число индивидуальных наименований увеличилось с 24 до 26, идентифицировано в контроле 4, в опыте – 7. Наиболее существенная положительная разница между «зерновкой» необработанных и СВЧ-обработанных растений зафиксирована для сиреновой кислоты, далее следует ванилиновая кислота (3.1 раза). Снижение относительно контрольных показателей зафиксировано для кофейной кислоты и составляет 28.6%. Кофейная кислота в условиях абиотического стресса (засухи) способна улучшать рост корней и побегов [37], снижать накопление АФК [38]. В нашей работе мы видим, что содержание кофейной кислоты имеет органоспецифичный характер. Так, у контрольных растений максимальное накопление кофейной кислоты отмечается в «зерновке», в листьях – меньше в 6.5 раза, в корнях – меньше в 12.0 раза. При воздействии СВЧ-излучения характер распределения этой фенольной кислоты изменяется в количественном соотношении: в листьях относительно «зерновки» кофейной кислоты меньше в 2.4 раза, в корнях – в 11.0 раза. Таким образом, общая сумма кофейной кислоты по всем органам ювенильного растения ячменя после СВЧ-обработки снизилась на 12.8% по сравнению с содержанием в контроле.

Большая, по сравнению с листьями, стабильность по сумме идентифицированных фенольных веществ отмечается в «зерновке»: разница составляет 7.0%, в то время как для корней этот показатель равен 39.7%, для листьев – 2.7 раза. Но есть и изменения, спровоцированные воздействием ЭМИ СВЧ. Три кислоты обнаружены только в обработанных образцах «зерновки». Полученные

данные свидетельствуют о том, что даже у недельных растений ячменя остаток зерновки сохраняет свою биохимическую активность и принимает участие в регуляторных и адаптивных реакциях растений в ответ на действие абиотического стрессора, что проявляется как в перераспределении одних фенольных кислот, так и в синтезе *de novo* других. По-видимому, снижение содержания кофейной кислоты в «зерновке» и корнях с одновременным ее ростом в листьях свидетельствует как о ресинтезе, так и о перераспределении веществ между различными анатомическими частями растения: в литературе не исключают такой возможности. Так, в работе [39] указывается, что фенольные кислоты могут находиться в свободных, конъюгированных и связанных состояниях. Кофейная кислота активно участвует в физиологии растений и механизмах стрессоустойчивости, в первую очередь используется растениями для синтеза лигнина. Механизм адаптации к стрессу включает также выработку феруловой кислоты через метилирование кофейной кислоты [40]. В нашей работе содержание феруловой кислоты по всем органам увеличивается под воздействием СВЧ-излучения.

Проведенная СВЧ-обработка привела к уменьшению числа соединений в корнях относительно нативных растений: число индивидуальных наименований уменьшилось с 11 до 10.

Таким образом, наши данные частично подтверждают результаты, полученные в работах [16, 28]. Наши результаты показывают, что содержание отдельных фенольных компонентов с антиоксидантными свойствами в составе тех или иных анатомических органах проростка ячменя увеличивается в сравнении с нативными образцами.

Синтез таких вторичных метаболитов в ювенильных растениях ячменя, как фенольных соединений, зависит от предварительного воздействия на семена электромагнитного излучения СВЧ. Качественный состав фенольных веществ с антиоксидантными свойствами после СВЧ-обработки семян ячменя меняется: в сумме по всем органам зафиксировано 55 веществ вместо 46, обнаруживаемых только в контрольном варианте. Наиболее активным антиоксидантным статусом обладает «зерновка», содержащая, в среднем, 25 фенольных соединений.

В большинстве научных работ констатируется увеличение количества фенольных соединений, но не раскрыт физиолого-биохимический механизм этого явления в связи со сложностью и

многообразием биохимических путей, его реализующих. Не исключено, что повышение уровня фенольных соединений является компенсаторной реакцией на выброс АФК.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования синтеза вторичных метаболитов – фенольных соединений – в «микрозелени» ячменя под влиянием ЭМИ СВЧ показали, что существует органоспецифическая ответная реакция. Это выражается в различном количественном и качественном соотношении содержания вторичных метаболитов, инициируемых действием электромагнитного излучения. Некоторые вещества регистрируются во всех трех изучаемых органах проростка, а некоторые имеют определенную локализацию. Общее количество фенольных веществ с антиоксидантными свойствами увеличивается после СВЧ-обработки. Полученные данные позволяют рекомендовать изученный режим СВЧ-обработки (420 Вт, 11 сек.) для предварительной обработки семян ячменя с целью включения их в состав пищевых и кормовых продуктов функциональной направленности и повышенного содержания антиоксидантных компонентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naikoo M.I., Dar M.I., Raghieb F., Jaleel H., Ahmad B., Raina A., Naushin F. // *Plant signaling molecules*. Woodhead Publishing, 2019, pp. 157-168.
2. Меньщикова Е.Б., Ланкин, В.З., Зенков Н.К., Бондарь И.А., Круговых Н.Ф., Труфакин В.А. Окислительный стресс. Проксиданты и антиоксиданты. М.: Слово, 2006. 566 с.
3. Xu J. G., Tian C. R., Hu Q. P., Luo J. Y., Wang X. D., Tian X. D. // *J. Agric. Food Chem.* 2009. Vol. 57, pp. 10392-10398.
4. Benincasa P., Galieni A., Anna C. M., Pace R., Guiducci M., Pisante M., Stagnari F. // *J. Sci. Food Agric.* 2015, Vol. 95, pp. 1795-1803.
5. Shysh S., Mazets Z., Shutava H., Sysha O., Gorgun Y. // *International Journal of Secondary Metabolite*. 2018. Т. 5, №3, pp. 252-258.
6. Ampofo J., Ngadi M., Ramaswamy H. S. // *Food and Bioprocess Technology*. 2020. Т. 13, № 9, pp. 1544-1555.
7. Ma Y., Wang P., Zhou T., Chen Z., Gu Z., Yang R. // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. Т. 99, № 11, pp. 5176-5186.
8. Al-Karaki G. N. // *J. Agron. Crop. Sci.* 2008, Vol. 181, pp. 229-235.
9. Thwe A.A., Kim Y., Li X., Kim Y.B., Park N.I., Kim H.H., Kim S.J., Park S.U. // *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2014. Vol. 174, pp. 2537-2547.
10. Wang S.M., Wang J.F., Guo Y.B. // *Polish J. Food Nutr. Sci.* 2018. Vol. 68, pp. 195-205.
11. Zhou X.L., Fang X., Zhou Y.M., Qian O.Y., Zhe L., Jun M.A. // *Food Sci. (Beijing)*. 2012. Vol. 33, pp. 20-23.
12. Kouchebagh S.B., Rasouli P., Babaiy A.H., Khanlou A.R. // *Int. J. Biosci.* 2015. Vol. 6, pp. 49-54.
13. Radzevičius A., Sakalauskiene S., Dagys M., Simniškis R., Karklelienė R., Bobinas Č., Duchovskis P. // *Zemdirbyste*. 2013. Vol. 100, pp. 179-184.
14. Kondratenko E.P., Soboleva O.M., Sukhikh A.S., Sergeeva I.A., Zakharova J.V. *Proceedings of IV International Scientific and Practical Conference «Modern S&T Equipments and Problems in Agriculture»*. 2020. Pp. 127-139.
15. Hayat K., Abbas S., Hussain S., Shahzad S. A., Tahir M. U. // *Industrial Crops and Products*. 2019. Т. 140, pp. 111610.
16. Seo D.H., Kim M.S., Choi H.W., Sung J.M., Park J.D., Kum J.S., // *Food. Sci. Biotechnol.* 2016. Vol. 25, pp. 111-114.
17. Wang S., Wang J., Guo Y. // *Polish journal of food and nutrition sciences*. 2018. Т. 68, № 3, pp. 195-205.
18. Uppal V., Bains K. // *J. Food. Sci. Tech. Mysore*. 2012 Vol. 49, pp. 184-191.
19. Chandel S., Kaur S., Singh H. P., Batish D. R., Kohli R. K. // *Journal of microscopy and ultrastructure*. 2017. Т. 5, № 4, pp. 225-229.
20. Yoon G. A., Yeum K. J., Cho Y. S., Chen C. Y. O., Tang G., Blumberg J. B., Russell R. M., Yoon S., Lee-Kim Y. C. // *Nutr. Res. Pract.* 2012. Vol. 6, pp. 481-490.
21. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K. V. // *Annals of botany*. 2003. Т. 91, № 2, pp. 179-194.
22. Bian Z. X., Wang J. F., Ma H., Wang S. M., Luo L., Wang S. M. // *Journal of Food Science and Technology*. 2020. Т. 57, № 10, pp. 3913-3919.
23. Zhou L.Y., Tey C.Y., Bingol G., Bi J.F. // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Т. 37, pp. 61-67.
24. Aniszewska M., Słowiński K. // *European Journal of Forest Research*. 2016. Т. 135, № 4, pp. 633-642.
25. Nam T.G., Lee S.M., Park J.H., Kim D.O., Ni B., Eom S.H. // *Food Chemistry*. 2015. Т. 170, pp. 97-101.
26. Chen Y. P., Jia J. F., Han X. L. // *Planta*. 2009. Т. 229, № 2, pp. 291-298.

27. Qiu Z.B., Guo J.L., Zhang M.M., Lei M.Y., Li Z.L. // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013. Т. 35, № 1, pp. 65-73.
28. Hassan S., Ahmad N., Ahmad T., Imran M., Xu C., Khan M. K. // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019. Т. 43, № 5, pp. e13924.
29. Agrawal A., Gupta E., Chaturvedi R. // *Int. J. Pure Appl. Biosci*. 2015. Vol. 3, pp. 311-316.
30. Falcinelli B., Benincasa P., Calzuola I., Gigliarelli L., Lutts S., Marsili V. // *Molecules*. 2017. Vol. 22, pp. 1-13.
31. Niroula A., Khatri S., Khadka D., Timilsina R. // *International Journal of Food Properties*. 2019. Т. 22, № 1, pp. 427-437.
32. Lahouar L., El-Bok S., Achour L. // *The American journal of Chinese medicine*. 2015. Т. 43, № 7, pp. 1311-1329.
33. Kowalczewski P. Ł., Radzikowska D., Ivanišová E., Szwengiel A., Kačániová M., Sawinska Z. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Т. 21, № 2, p. 397.
34. Перспективы развития высокочастотной технологии обработки семян сельскохозяйственных культур / Цугленок Н.В. // *Научно-технический бюллетень*. 1979. № 5. С. 40.
35. Zhang S., Bi H., Liu C. // *Separation and Purification Technology*. 2007. Т. 57, № 2, pp. 277-282.
36. Беляев В.Н., Щукина О.В., Яшин А.Я., Яшин Я.И., Федорова И.В., Чукичева И.Ю., Кучин А.В. // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2019. № 12. С. 2325-2330.
37. Malik N.S., Perez J.L., Kunta M., Olanya M. // *Open Agric. J*. 2015. Vol. 9, pp. 1-5.
38. Li Q., Yu B., Gao Y., Dai A.H., Bai J.G. // *J. Plant Physiol*. 2011. Vol. 168, pp. 927-934.
39. Idehen E., Tang Y., Sang S. // *Journal of food and drug analysis*. 2017. Т. 25, № 1, pp. 148-161.
40. Riaz U., Kharal M. A., Murtaza G., uz Zaman Q., Javaid S., Malik H. A., Abbas Z. // *Pakistan Journal of Agricultural Research*. 2019. Т. 32, № 1, p. 8.

*Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия*

\*Соболева О. М., кандидат биологических наук, доцент кафедры агробиотехнологий  
E-mail: meer@yandex.ru

*Кондратенко Е. П., доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агрономии, селекции и семеноводства*

E-mail: meer@yandex.ru

*Кемеровский государственный медицинский университет*

Сухих А. С., кандидат фармацевтических наук, старший научный сотрудник Центральной научно-исследовательской лаборатории

E-mail: suhikh\_as@list.ru

*Kuzbass State Agricultural Academy*

\*Soboleva O. M., PhD., Associate professor, department of agrobiotechnology  
E-mail: meer@yandex.ru

*Kondratenko E. P., PhD., DSci., Full professor, dept. of agronomy, breeding and seed production*

E-mail: meer@yandex.ru

*Kemerovo State Medical University*

Sukhikh A. S., PhD., Senior Researcher, Central Research Laboratory

E-mail: suhikh\_as@list.ru

## SYNTHESIS OF PHENOLIC COMPOUNDS IN BARLEY SEEDLINGS UNDER THE INFLUENCE OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC RADIATION

O. M. Soboleva<sup>1,2</sup>, E. P. Kondratenko<sup>1</sup>, A. C. Sukhikh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kuzbass State Agricultural Academy

<sup>2</sup> Kemerovo State Medical University

**Abstract.** Phenolic compounds have a protective effect on the organ-tissue structure of the plant organism and reduce the negative impact of ultraviolet radiation, can perform the functions of natural antibiotics, and also determine the color and taste of grain and its processed products. Phenolic substances are involved in the processes of growth, morphogenesis, respiration and photosynthesis, are reserve and



signaling substances, and have antioxidant properties. The aim is to study the nature of quantitative and qualitative changes in the content of phenolic substances in different anatomical parts of barley seedlings under the action of an ultrahigh frequency electromagnetic radiation.

To determine the effect of the ultrahigh frequency electromagnetic radiation on the content of phenolic substances with antioxidant properties in the organs of seedlings, spring barley (*Hordeum vulgare* L.) of the Nikita variety was used. The scheme of the experiment included two modes: 1. Control, without processing; 2. MICROWAVE processing: power 0.42 kW, magnetron frequency 2.45 MHz, exposure 11 seconds. In the seven-day seedlings, the determination of phenolic substances was carried out using the HPLC analysis with an amperometric detector.

The maximum number of phenolic compounds is registered in the chloroform extract of the endosperm of the microwave-treated grain, their number is 26 names of substances. The minimum number of individual substances is 10-11 and is found in samples of roots and sprouts of native seedlings, as well as roots of microwave-irradiated barley plants. The microwave treatment affected both the number of isolated substances and their amount in the extract. The most biochemically active anatomical part of a seven-day-old barley seedling is the endosperm: it contains significantly more substances of a phenolic nature, recorded by an amperometric detector, than in sprouts and roots. The microwave field significantly affected the amount of phenolic compounds with antioxidant properties in the endosperm.

In relation to phenolic substances in the composition of barley seedlings, there is an organ-specific response, which is expressed in the difference in their quantitative and qualitative content. Individual phenolic substances are registered in all the organs of the seedling (roots, leaves, endosperm), and some have a certain localization. The total amount of phenolic substances with antioxidant properties increases after microwave treatment. The obtained data allow us to recommend the studied mode of microwave processing (420 W, 11 sec.) for pretreatment of barley seeds in order to include them in the composition of food and feed products of a functional orientation and an increased content of antioxidant components.

**Keywords:** barley; *Hordeum vulgare*; phenolic substances; antioxidant properties; ultrahigh frequency electromagnetic radiation, seedlings, microgreens.

## REFERENCES

1. Naikoo M.I., Dar M.I., Raghieb F., Jaleel H., Ahmad B., Raina A., Naushin F., Plant signaling molecules. Woodhead Publishing, 2019, pp. 157-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5>
2. Men'shchikova E.B. i dr. Okislitel'nyj stress. Prooksidanty i antioksidanty. M.: Slovo, 2006, 566 s.
3. Xu J. G., Tian C. R., Hu Q. P., Luo J. Y., Wang X. D., Tian X. D., J. Agric. Food Chem., 2009, Vol. 57, pp. 10392-10398. DOI: 10.1021/jf902778j.
4. Benincasa P., Galieni A., Anna C. M., Pace R., Guiducci M., Pisante M., Stagnari F., J. Sci. Food Agric., 2015, Vol. 95, pp. 1795-1803. DOI: 10.1002/jsfa.6877.
5. Shysh S., Mazets Z., Shutava H., Sysya O., Gorgun Y., International Journal of Secondary Metabolite, 2018, T. 5, №3, pp. 252-258. DOI: 10.21448/ijsm.459102
6. Ampofo J., Ngadi M., Ramaswamy H. S., Food and Bioprocess Technology, 2020, T. 13, № 9, pp. 1544-1555. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02496-9>
7. Ma Y., Wang P., Zhou T., Chen Z., Gu Z., Yang R., Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, T. 99, № 11, pp. 5176-5186. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9764>
8. Al-Karaki G. N., J. Agron. Crop. Sci., 2008, Vol. 181, pp. 229-235. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1998.tb00422.x.
9. Thwe A.A., Kim Y., Li X., Kim Y.B., Park N.I., Kim H.H., Kim S.J., Park S.U., Appl. Biochem. Biotechnol., 2014, Vol. 174, pp. 2537-2547. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1203-9>
10. Wang S.M., Wang J.F., Guo Y.B., Polish J. Food Nutr. Sci., 2018, Vol. 68, pp. 195-205. DOI: 10.1515/pjfn-2017-0025
11. Zhou X.L., Fang X., Zhou Y.M., Qian O.Y., Zhe L., Jun M.A., Food Sci. (Beijing), 2012, Vol. 33, pp. 20-23.
12. Kouchebagh S.B., Rasouli P., Babaiy A.H., Khanlou A.R., Int. J. Biosci., 2015, Vol. 6, pp. 49-54. DOI: <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/6.5.49-54>
13. Radzevičius A., Sakalauskienė S., Dagys M., Simniškis R., Karklelienė R., Bobinas Č., Duchovskis P., Zemdirbyste, 2013, Vol. 100, pp. 179-184. DOI 10.13080/z-a.2013.100.023
14. Kondratenko E.P., Soboleva O.M., Sukhikh A.S., Sergeeva I.A., Zakharova J.V. Proceedings of IV International Scientific and Practical Conference «Modern S&T Equipments and Problems in Agriculture», 2020, pp. 127-139. DOI: <https://doi.org/10.32743/kuz.mepa.2020.127-139>

15. Hayat K., Abbas S., Hussain S., Shahzad S. A., Tahir M. U., *Industrial Crops and Products*, 2019, T. 140, pp. 111610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111610>
16. Seo D.H., Kim M.S., Choi H.W., Sung J.M., Park J.D., Kum J.S., *Food. Sci. Biotechnol.*, 2016, Vol. 25, pp. 111-114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0016-8>
17. Wang S., Wang J., Guo Y., *Polish journal of food and nutrition sciences*, 2018, T. 68, № 3, pp. 195-205. DOI: [10.1515/pjfn-2017-0025](https://doi.org/10.1515/pjfn-2017-0025)
18. Uppal V., Bains K., *J. Food. Sci. Tech. Mysore*, 2012, Vol. 49, pp. 184-191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0273-8>
19. Chandel S., Kaur S., Singh H. P., Batish D. R., Kohli R. K., *Journal of microscopy and ultrastructure*, 2017, T. 5, № 4, pp. 225-229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.09.001>
20. Yoon G. A., Yeum K. J., Cho Y. S., Chen C. Y. O., Tang G., Blumberg J. B., Russell R. M., Yoon S., Lee-Kim Y. C., *Nutr. Res. Pract.*, 2012, Vol. 6, pp. 481-490. DOI: [10.4162/nrp.2012.6.6.481](https://doi.org/10.4162/nrp.2012.6.6.481)
21. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K. V., *Annals of botany*, 2003, T. 91, № 2, pp. 179-194. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf118>
22. Bian Z. X., Wang J. F., Ma H., Wang S. M., Luo L., Wang S. M., *Journal of Food Science and Technology*, 2020, T. 57, № 10, pp. 3913-3919. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04451-0>
23. Zhou L.Y., Tey C.Y., Bingol G., Bi J.F., *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, T. 37, pp. 61-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.002>
24. Aniszewska M., Słowiński K., *European Journal of Forest Research*, 2016, T. 135, № 4, pp. 633-642. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0960-0>
25. Nam T.G., Lee S.M., Park J.H., Kim D.O., Ni B., Eom S.H., *Food Chemistry*, 2015, T. 170, pp. 97-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.067>
26. Chen Y. P., Jia J. F., Han X. L., *Planta*, 2009, T. 229, № 2, pp. 291-298. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-008-0828-8>
27. Qiu Z.B., Guo J.L., Zhang M.M., Lei M.Y., Li Z.L., *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, T. 35, № 1, pp. 65-73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1048-1>
28. Hassan S., Ahmad N., Ahmad T., Imran M., Xu C., Khan M. K., *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, T. 43, № 5, pp. e13924. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.13924>
29. Agrawal A., Gupta E., Chaturvedi R., *Int. J. Pure Appl. Biosci.*, 2015, Vol. 3, pp. 311-316.
30. Falcinelli B., Benincasa P., Calzuola I., Gigliarelli L., Lutts S., Marsili V., *Molecules*, 2017, Vol. 22, pp. 1-13. DOI: [10.3390/molecules22122132](https://doi.org/10.3390/molecules22122132).
31. Niroula A., Khatri S., Khadka D., Timilsina R., *International Journal of Food Properties*, 2019, T. 22, № 1, pp. 427-437. DOI: <https://doi.org/10.1080/0942912.2019.1588297>
32. Lahouar L., El-Bok S., Achour L., *The American journal of Chinese medicine*, 2015, T. 43, № 7, pp. 1311-1329. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0192415X15500743>
33. Kowalczewski P. Ł., Radzikowska D., Ivanišová E., Szwengiel A., Kačaniová M., Sawinska Z., *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, T. 21, № 2, p. 397. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21020397>
34. Cuglenok N.V. *Perspektivy razvitiya vysokochastotnoj tekhnologii obrabotki semyan sel'skohozyajstvennykh kul'tur*, *Nauchno-tehnicheskij byulleten'*, 1979, № 5. S. 40.
35. Zhang S., Bi H., Liu C., *Separation and Purification Technology*, 2007, T. 57, № 2, pp. 277-282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.022>
36. Belyaev V.N., SHCHukina O.V., YAshin A.YA., YAshin YA.I., Fedorova I.V., CHukicheva I.YU., Kuchin A.V., *Izvestiya Akademii nauk. Seriya himicheskaya*, 2019, № 12. S. 2325-2330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11172-019-2706-x>
37. Malik N.S., Perez J.L., Kunta M., Olanya M., *Open Agric. J.*, 2015, Vol. 9, pp. 1-5. <https://doi.org/10.2174/1874331501509010001>.
38. Li Q., Yu B., Gao Y., Dai A.H., Bai J.G., *J. Plant Physiol.*, 2011, Vol. 168, pp. 927-934. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.11.025>
39. Idehen E., Tang Y., Sang S., *Journal of food and drug analysis*, 2017. T. 25, № 1, pp. 148-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.08.002>
40. Riaz U., Kharal M. A., Murtaza G., uz Zaman Q., Javaid S., Malik H. A., Abbas Z., *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 2019, T. 32, № 1, p. 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2019/32.1.8.19>