

УДК 543.544.32:633.16

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЧ НА ЖИРНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ ПРОРОСТКОВ *HORDEUM SATIVUM*\*

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

<sup>1</sup> Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт,  
ул. Марковцева, 5, Кемерово, 650056 (Россия), e-mail: meer@yandex.ru

<sup>2</sup> Кемеровский государственный медицинский университет Министерства  
здравоохранения Российской Федерации, ул. Ворошилова, 22а, 650029  
(Россия)

Исследована изменчивость жирных кислот в тканях проростков ячменя под влиянием электромагнитного поля сверхвысокой частоты (СВЧ). Объектом исследований являлись семена яровой разновидности ячменя посевного (*Hordeum sativum* L.). Схема эксперимента включала в себя два варианта: контроль без обработки и электромагнитное облучение сверхвысокими частотами с мощностью 0,42 кВт, частотой 2,45 ГГц, экспозицией 11 сек.

В составе ненасыщенных жирных кислот в ростке и корнях проростков, а также в оболочке семян ячменя преобладают полиненасыщенные жирные кислоты – линолевая и линоленовая. Это обуславливает высокие значения индексов двойных связей в ростках и корнях наряду с высокими значениями коэффициента ненасыщенности в оболочках и эндосперме. Этот факт свидетельствует о повышении потенциала устойчивости семян при обработке абиотическим фактором стресса – электромагнитным полем сверхвысокой частоты.

Анализ изменений жирных кислот, происходящих в разных органах проростка, показал, что в ростках, эндосперме и оболочке под влиянием электромагнитного поля СВЧ происходит снижение содержания насыщенных и, соответственно, увеличение ненасыщенных жирных кислот. В корнях выявлена обратная тенденция – повышение суммы насыщенных и уменьшение ненасыщенных жирных кислот. Установлено, что изменения в жирнокислотном составе липидов и уровне активности таких ферментов, как ω9-, ω6- и ω3-десатуразы под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты также имеют различия по органам проростка. Полученные результаты дают основание полагать, что электромагнитное поле СВЧ влияет на биосинтез жирных кислот, липидов и активацию синтеза ферментов, участвующих в этом процессе.

*Ключевые слова:* ячмень, электромагнитное поле сверхвысокой частоты, жирные кислоты, коэффициент ненасыщенности, индекс двойных связей, десатуразы.

### Введение

Липиды клеточных мембран играют ключевую роль в процессах адаптации и формировании устойчивости растений к стрессорам, например, температурным. Эта устойчивость коррелирует с наличием в клеточных мембранах полиненасыщенных ЖК [1, 2]. Известно, что именно ненасыщенные ЖК в структуре мембран определяют ее «текучесть» [3]. Текучесть мембраны напрямую зависит от доли ненасыщен-

---

*Кондратенко Екатерина Петровна* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, e-mail: kondratenko.e.p@yandex.ru

*Соболева Ольга Михайловна* – кандидат биологических наук, доцент кафедры технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, e-mail: meer@yandex.ru  
*Сухих Андрей Сергеевич* – старший научный сотрудник центральной научно-исследовательской лаборатории, кандидат фармацевтических наук, доцент, e-mail: Suhih\_as@list.ru

ных жирных кислот, при этом при увеличении числа двойных связей и длины углеводородной цепи [4] снижается температура плавления соответствующей жирной кислоты, что приводит к увеличению пластичности липидного бислоя. Это играет существенную роль в молекулярном механизме адаптации клеток к температурному стрессу, первичная роль отводится мембранным липидам и ферментам десатуразам, катализирую-

\* Данная статья имеет электронный дополнительный материал (приложение), который доступен читателям на сайте журнала. DOI: 10.14258/jcrpm.2017031792s

\*\* Автор, с которым следует вести переписку.

шим синтез ненасыщенных ЖК. При данном виде стресса снижается текучесть мембран, что приводит к усиленному синтезу десатураз в клетке, их активации и, как следствие, к усилению синтеза полиненасыщенных жирных кислот в мембранных липидах [5]. В результате этих процессов текучесть мембран восстанавливается. Таким образом, именно активность десатураз является одним из ключевых моментов адаптации растений к температурному стрессу [6].

Биотрансформация ЖК в организме происходит с участием двух типов ферментов – элонгазы, осуществляющей удлинение углеродной цепочки, и десатуразы, ответственной за появление новой двойной связи в молекуле ЖК. Индекс активности элонгазы является показателем активности синтеза ЖК. Жирнокислотные индексы активности ферментов используются для оценки активности этих ферментов [7, 8]. В последние годы исследования десатураз стали весьма актуальными, и сейчас отмечается более глубокое понимание фундаментальных механизмов кислородной десатурации жирных кислот [9].

В последние годы интерес к использованию электромагнитных технологий в различных отраслях народного хозяйства повсеместно растет, но до сих пор нет полной и систематизированной информации о процессах, сопровождающих влияние электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) на отдельные ресурсные компоненты растительных клеток, например, жирные кислоты.

Несмотря на относительную изученность биохимических процессов, обеспечивающих адаптивные изменения липидного состава под действием различных абиотических факторов, в том числе – антропогенного происхождения, вопросы липидного метаболизма при обработке растений ЭМП остаются малоизученными. Этим объясняется интерес к изучению механизма адаптации растений к ЭМП. Логично предположить, что анализ жирнокислотного состава суммарных липидов из тканей проростков ячменя, а также оценка активности десатураз при действии ЭМП будет способствовать пониманию их роли в формировании устойчивости растений к этому фактору.

В этой связи цель исследования – изучение состава жирных кислот в анатомических органах проростков ячменя под влиянием электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

### **Экспериментальная часть**

Объектом исследований являлись семена яровой разновидности ячменя посевного (*Hordeum sativum* L.) сорта Никита. Схема эксперимента включала в себя два варианта: контроль – без обработки и электромагнитное облучение сверхвысокими частотами с мощностью 0,42 кВт, частотой 2,45 ГГц, экспозицией 11 сек. После обработки и проращивания в течение 7 суток из всех анатомических частей проростков (ростков, корней, эндосперма, оболочек) навески экстрагировали смесью хлороформ : *n*-гексан в режиме пробоподготовки, опубликованной в работе [10]. Приготовление метиловых эфиров жирных кислот осуществляли следующим образом. Образец объемом 1 мл помещали в виалу объемом 1,5 мл, смесь растворителей отдували азотом досуха. К остатку добавляли 500 мкл метилата натрия в MeOH приготовленного по ГОСТ Р 51486-99 и нагревали при 90°C в течение 15 мин, затем добавляли 750 мкл 3%-ного раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в метаноле и 100 мкл толуола. К полученному раствору добавляли внутренний стандарт (5 мкг метилундеcanoата). Затем образец нагревали при 90 °С в течение 60 мин. Далее проводили экстракцию 700 мкл *n*-гексана (тремя порциями). Объединенные экстракты промывали бидистиллированной водой. Гексановую фракцию концентрировали отдувкой растворителя до объема около 50 мкл. Полученную пробу, содержащую жирные кислоты в виде метиловых эфиров, использовали для анализа. Анализ проводили на хроматомасс-спектрометре Agilent 7000В (США). Объем пробы – 2 мкл, ввод без деления потока. Колонка: ZB-WAX, 30 м x 0,25 мм x 0,25 мкм. Условия хроматографирования: Oven Program при 100°C от 0 мин, с нагревом 7 °С/мин до 260 °С – 10 мин, скорость потока – 1,2 мл/мин. Идентификацию осуществляли по масс-спектрам (библиотека масс-спектров NIST 02.L) и индексам удерживания. Расчет массового содержания метиловых эфиров кислот производили относительно известного количества метилундеcanoата (внутренний стандарт). Калибровка выполнена с использованием стандартных образцов (Sigma-Aldrich), состоящих из цепей различной длины и насыщенности (8:0; 16:0; 18:1; 20:4; 22:6).

Для оценки степени ненасыщенности ЖК в тканях использовали индекс двойных связей (ИДС) [11]:

$$\text{ИДС} = \frac{\sum P_j \cdot n}{100},$$

где P<sub>j</sub> – содержание жирных кислот (вес, %) и n – количество двойных связей в каждой кислоте.

Также использовали коэффициент ненасыщенности жирных кислот (К) как отношение суммы ненасыщенных ЖК к сумме насыщенных. Активность ацил-липидных  $\omega$ 9-,  $\omega$ 6- и  $\omega$ 3-десатураз, участвующих в биосинтезе олеиновой, линолевой и  $\alpha$ -линоленовой кислот, определяли, соответственно, по уравнениям 1, 2 и 3, где SDR – стеариол-десатуражное соотношение, ODR – олеил-десатуражное соотношение, LDR – линолеил-десатуражное соотношение:

$$\text{SDR} = (\%C18:1)/(\%C18:0+\%C18:1) \quad (1)$$

$$\text{ODR} = (\%C18:2 +\%C18:3)/(\% C18:1+\% C18:2 +\%C 18:3) \quad (2)$$

$$\text{LDR} = (\%C18:3)/(\% C18:2 +\%C18:3) \quad (3)$$

### Обсуждение результатов

Жирные кислоты (ЖК) представляют собой алифатические одноосновные карбоновые кислоты с открытой цепью, содержащиеся в основном в этерифицированной форме в жирах, маслах и восках растительного и животного происхождения. Жирные кислоты являются структурными компонентами различных липидов. Благодаря своей структуре при окислении ЖК дают в два раза больше энергии, чем полисахариды, что делает жир наиболее эффективной формой для хранения избыточной энергии у живых организмов. Поскольку увеличение клеточной концентрации ЖК является токсичным, они хранятся в основном в виде триглицеридов во внутриклеточных нейтральных липидных каплях, которые функционируют и как резервуары энергии, и как запас ЖК и стерина, необходимый для синтеза мембран [12]. Каждая клетка растительного организма содержит жирные кислоты в составе мембранных липидов, это означает, что в каждой клетке есть ферменты биосинтеза жирных кислот.

Для синтеза ненасыщенных жирных кислот в развивающихся семенах эндоплазматический ретикулум имеет особое значение – здесь в больших количествах хранятся ЖК 18:2 и 18:3 [9].

В состав большинства мембран живых организмов входят липиды, в составе которых обнаружены ЖК с 14, 16, 18, 20, 22 или 24 атомами углерода. Насыщенные ЖК, в отличие от ненасыщенных, весьма устойчивы к окислению. Температуры плавления ЖК возрастают с увеличением длины цепи, а их растворимость в воде уменьшается.

В течение последних двух десятилетий полиненасыщенные ЖК стали объектом пристального внимания как зарубежных, так и отечественных исследователей [13]. Известно, что в обмене веществ участвуют следующие ненасыщенные жирные кислоты: пальмитолеиновая ( $\omega$ 7, C16:1, D9), олеиновая ( $\omega$ 9, 18:1, D9), линолевая ( $\omega$ 6, 18:2, D9,12), линоленовая ( $\omega$ 3, 18:3, D9, 12, 15). Жирные кислоты, состоящие из 18 углеродных атомов линолевая и линоленовая кислоты в организме человека и животных не синтезируются и являются незаменимыми. Именно они находятся в организме животных как редшестьвенники длинноцепочечных ЖК, выполняющих пластическую и регуляторную роль [14]. В зависимости от расположения первой двойной связи у 3-, 6-, 7- или 9-го атома углерода, полиненасыщенные ЖК делятся на семейства  $\omega$ 3,  $\omega$ 6,  $\omega$ 7 и  $\omega$ 9. К семейству  $\omega$ 3 относят линоленовую кислоту. Представителем  $\omega$ 6 является линолевая кислота. Биологические эффекты, оказываемые этими кислотами, реализуются на клеточном и органном уровнях. Являясь структурными компонентами биологических мембран клеток, они оказывают непосредственное влияние на текучесть липидного бислоя, проницаемость мембран, мембранносвязанную ферментативную активность, электрофизиологические свойства мембран.

Результаты анализа химического состава ЖК исследуемых тканей семян ячменя приведены в таблице. Изучались изменения состава ЖК отдельных органов проростков ячменя и сравнение соотношения  $\omega$ 3 и  $\omega$ 6 под влиянием обработки ЭМП СВЧ. Из представленных данных следует, что основной насыщенной ЖК во всех тканях проростка ячменя, кроме эндосперма, является пальмитиновая кислота (C16:0). Ее содержание составляет относительно суммы всех кислот в опытном варианте от 0,44% в эндосперме, 22,3% в ростках, 31,45% в оболочках, до 62,6% в корнях. Кроме пальмитиновой, в тканях органов проростка в небольших количествах установлено наличие насыщенных ЖК с 14, 17, 23, 25, 26 углеродными атомами.

Изменение состава и содержания жирных кислот (%) в анатомических частях зерновки ячменя под влиянием ЭМП СВЧ

Кислота	Ростки		Корни		Эндосперм		Оболочка	
	контроль	опыт	контроль	опыт	контроль	опыт	контроль	опыт
Пальмитиновая (C16:0)	10,34	5,64	18,53	35,01	59,35	0,26	29,78	29,04
Стеариновая (C18:0)	1,19	1,48	5,66	3,22	6,68	3,61	1,60	1,66
Бегеновая (C22:0)	1,22	1,91	1,86	3,53	0,55	0,22	0,33	0,53
Лигноцериновая (C24:0)	1,13	1,74	3,52	8,14	0,72	0,08	0,33	0,42
Арахидиновая (C20:0)	0,73	1,04	0,82	1,39	0,24	0,22	0,29	0,44
Гексакозановая (C26:0)	1,68	5,41	1,40	1,9	0,27	0,34	0,16	0,19
Олеиновая (C18:1)	1,46	1,85	0,88	4,72	2,04	52,93	7,88	10,82
Линолевая (C18:2)	1,77	2,27	0,41	0,29	5,18	0,94	42,10	47,56
Линоленовая (C18:3)	1,80	2,50	0,11	0,71	0,11	0,27	1,01	1,63
$\Sigma$ SFA	16,29	18,26	31,8	50,19	67,8	4,73	32,3	32,3
$\Sigma$ UFA	5,03	6,62	1,40	5,72	7,30	54,14	51,00	60,01
<b>K</b>	0,31	0,40	0,04	0,11	0,11	11,45	1,58	1,86
<b>ИДС</b>	1,3	1,5	2,0	3,4	4,1	3,6	3,1	5,5
<b>SDR</b>	0,6	0,6	0,1	0,6	0,2	0,9	0,8	0,9
<b>ODR</b>	0,7	0,7	0,4	0,2	0,7	0,02	0,8	0,8
<b>LDR</b>	0,5	0,5	0,2	0,7	0,02	0,2	0,02	0,03

Примечание.  $\Sigma$ SFA – сумма насыщенных жирных кислот;  $\Sigma$ UFA – сумма ненасыщенных жирных кислот; K – коэффициент ненасыщенности; ИДС – индекс двойных связей; SDR – стеролил-десатуразное отношение; ODR – олеил-десатуразное отношение; LDR – ленолил-десатуразное отношение.

В составе ненасыщенных ЖК липидов исследуемых тканей идентифицированы моноеновые, диеновые и триеновые ЖК, образующие  $\omega$ 9, 2  $\omega$ 6 и 3  $\omega$ 3 биосинтетические семейства ЖК. Моноеновые ЖК в составе липидов включали в себя  $\omega$ 7 и  $\omega$ 5 ЖК. Среди  $\omega$ 9 моноеновых ЖК были идентифицированы: олеиновая кислота, содержание которой в тканях варьирует от 1,85% (ростки) до 52,93% (эндосперм).

У исследованных тканей проростков ячменя были обнаружены жирные кислоты из семейства диеновых 18:2,  $\omega$ 6 и триеновых 18:3,  $\omega$ 3, в синтезе которой принимают участие  $\omega$ 6- и  $\omega$ 3-десатуразы, были идентифицированы линолевая и линоленовая кислоты. В небольших количествах обнаружены и другие ненасыщенные ЖК: моноеновые с 14, 16, 17, 20, 22, 24 углеродными атомами и диеновая C20:2. В ростках проростков ячменя увеличивается содержание ненасыщенных ЖК, особенно заметно увеличение линоленовой после воздействия ЭМП СВЧ в 1,4 раза по сравнению с контрольным вариантом. В корнях наблюдается повышение содержания олеиновой в 5,4 раза и линоленовой – в 6,5 раза, в эндосперме – в 25,9 раз моноеновой олеиновой, в 2,5 раза – триеновой ЖК линоленовой, в оболочке зерновки – олеиновой в 1,4 раза, а линолевой – в 1,13 раза.

Из представленных данных следует, что высокая степень ненасыщенности ЖК в тканях проростка ячменя после воздействия ЭМП СВЧ обусловлена в основном тремя кислотами – олеиновой ( $\omega$ 9), линолевой ( $\omega$ 6) и  $\alpha$ -линоленовой ( $\omega$ 3), причем в оболочке и эндосперме наблюдается заметное увеличение суммы ненасыщенных ЖК. Увеличивается содержание олеиновой в эндосперме и оболочках и  $\alpha$ -линоленовой в корнях.

Индекс двойной связи – ИДС, интегральная величина, характеризующая степень ненасыщенности ЖК и, по-видимому, напрямую связан с влиянием ЭМП СВЧ на семена. Так, некоторыми исследователями показано, что индекс двойных связей хорошо коррелирует с текучестью мембраны [15]. В нашей работе в ростках данный показатель составляет 1,5, в корнях – 3,4, эндосперме – 3,6, оболочке – 5,5, на контроле ИДС меньше во всех органах проростка, кроме эндосперма. По данным авторов [16], индекс ненасыщенности ЖК в тканях проростков кукурузы и пшеницы составил 0,97 и 1,09. Индексы двойной связи различаются у разных тканей проростков. Отмечен довольно высокий ИДС оболочки. Представленные данные свидетельствуют, что степень ненасыщенности жирных кислот в тканях проростка закономерно изменяется при обработке в условиях ЭМП СВЧ. В ростках после облучения СВЧ наблюдается увеличение насыщенных, кроме пальмитиновой, и ненасыщенных ЖК; в корнях отмечается заметное увеличение пальмитиновой и бегеновой ЖК в 1,9 раза, лигноцериновой – в 2,3 раза; в эндосперме и оболочках уменьшение суммы всех насыщенных жирных кислот и увеличение ненасыщенных. Этот факт подтверждается соответствующими изменениями коэффициента насыщенности (K) и индекса содержания двойных связей (ИДС). Индекс двойных связей, а он более полно, чем коэффициент ненасыщенности, характеризует степень ненасыщенности липидов, во всех случаях увеличивается под воздействием ЭМП СВЧ.

Установлены изменения активности десатураз при воздействии на семена ЭМП СВЧ. Исходя из вычисленных коэффициентов SDR, ODR и LDR, активность соответствующих десатураз ( $\omega 9$ ,  $\omega 6$  и  $\omega 3$ ) представленных тканей имела различный уровень (табл.). Считается, что гены ацил-липидной  $\omega 9$ -десатуразы, обеспечивающей введение первой двойной связи, всегда работают на одном постоянном уровне [17]. Однако это наблюдается только в ростках и корнях (SDR = 0,6). Значение SDR меняется в эндосперме и оболочках (SDR = 0,9) – наблюдается достоверное увеличение соответствующего коэффициента. Возможно, это связано с большим содержанием короткоцепочечных ЖК, которые, как известно, могут поддерживать текучесть мембран на оптимальном уровне [18].

Олеил-десатуразное соотношение (ODR) в ростках и оболочке характеризуется высокими значениями – 0,7 и 0,8 соответственно. Это свидетельство того, что олеиновая кислота C18:1,  $\omega 9$  активно конвертируется ацил-липидной  $\omega 6$ -десатуразой в линолевую кислоту. Высокое значение олеил-десатуразного отношения указывает также на важную функциональную роль этого фермента в адаптации тканей проростков к используемому абиотическому фактору – ЭМП СВЧ.

Линолеил-десатуразное отношение (LDR) в тканях проростков ячменя находятся в пределах от 0,03 (оболочки), 0,2 (эндосперм), 0,5 (ростки) до 0,7 (корни). Таким образом, установлена межорганный специфичность в уровне активности  $\omega 3$ -десатуразы.

### **Выводы**

Исследования межорганный изменчивости состава жирных кислот в проростках ячменя под влиянием ЭМП СВЧ показали, что этот состав имеет органоспецифический характер. Это выражается в различном соотношении содержания основных насыщенных и ненасыщенных ЖК. В составе ненасыщенных ЖК всех изученных тканей преобладают полиненасыщенные ЖК – олеиновая, линолевая и  $\alpha$ -линоленовая, что обуславливает высокие значения индекса двойных связей до 1,5–5,5 у опытных образцов. Наряду с высокими значениями коэффициента ненасыщенности ( $K=0,40$ – $11,45$  у вариантов с СВЧ-обработкой) этот факт свидетельствует о высокой адаптивности тканей проростков к воздействию ЭМП СВЧ.

Анализ изменения в составе ЖК в органах проростка ячменя под влиянием ЭМП СВЧ показал, что во всех тканях происходит увеличение ненасыщенных ЖК. В корнях проростков и оболочке семян наблюдается увеличение ненасыщенных и насыщенных ЖК. Установлено, что изменения в жирнокислотном составе липидов и уровне активности  $\omega 9$ - и  $\omega 3$ -десатураз в тканях органов проростка в условиях ЭМП СВЧ имеют межорганные отличия. В то же время активность  $\omega 6$ -десатуразы в эндосперме и оболочке семян остается на высоком уровне. Такие изменения могут быть следствием существенных адаптационных перестроек жирнокислотного обмена.

Таким образом, среди прочего, ЭМП СВЧ влияют на процесс биосинтеза ЖК.

### **Список литературы**

1. Kuiper P.J.C. Lipid metabolism of higher plants as a factor in environmental adaptation // *Dev. Plant Biol.* 1984. Vol. 9. Pp. 525–530.
2. Thewke D., Kramer M., Sinensky M.S. Transcriptional homeostatic control of membrane lipid composition // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2003. Vol. 273. Pp. 1–4.
3. Los D.A., Murata N. Membrane fluidity and its role in the perception of environmental signals // *Biochim. Biophys. Acta.* 2004. Vol. 1666. Pp. 142–157.
4. Arisawa K., Mitsudome H., Yoshida K., Sugimoto S., Ishikawa T., Fujiwara Y., Ichi I. Saturated fatty acid in the phospholipid monolayer contributes to the formation of large lipid droplets // *Biochem. and Biophys. Research Commun.* 2016. Vol. 480, N4. Pp. 641–647.
5. Ильинская Л.И., Озерцовская О.Л. Продукты липоксигеназного окисления жирных кислот как сигнальные молекулы в индуцировании устойчивости растений // *Прикладная биохимия и микробиология.* 1998. Т. 34, №5. С. 467–479.
6. Лось Д.А. Структура, регуляция экспрессии и функционирование десатураз жирных кислот // *Успехи биологической химии.* 2001. №41. С. 163–198.
7. Warensjö E., Sundström J., Vessby B., Cederholm T., Risérus U. Markers of dietary fat quality and fatty acid desaturation as predictors of total and cardiovascular mortality: a population-based prospective study // *J. Clin. Nutr.* 2008. Vol. 88. Pp. 203–209.
8. Jeyakumar S.M., Lopamudra P., Padmini S., Balakrishna N. et al. Fatty acid desaturation index correlates with body mass and adiposity indices of obesity in Wistar NIN obese mutant rat strains WNIN/Ob and WNIN/GR-Ob Nutrition // *Metabolism Nutrition & Metabolism.* 2009. Vol. 6. Pp. 27.

9. Schmid K.M., Ohlrogge J. B. Lipid metabolism in plants // *Biochemistry of lipids, lipoproteins and membranes*. 2002, Elsevier Science. Pp. 93–126.
10. Захарова Ю.В., Сухих А.С. Хроматографический анализ жирных кислот клеточных стенок бифидобактерий с различной гидрофобностью // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15. №6. С. 776–783.
11. Zhivet'ev M.A., Graskova I.A., Dudareva L.V., Stolbikova A.V., Voinikov V.K. Change of fatty-acid composition in plants during adaptation to hypothermia // *Journal of Stress Physiol. & Biochemistry*. 2010. Vol. 6, N4. Pp. 51–65.
12. Bicalha B., David F., Rumpel K., Kindt E., Sandra P. Creating a fatty acid methyl ester database for lipid profiling in a single drop of human blood using high resolution capillary gas chromatography and mass spectrometry // *J. of Chromatogr. A*. 2008. Vol. 1211. Pp. 120–128.
13. Шилин Н.М., Конь И.Я. Современные представления о физиологических и метаболических функциях ПНЖК // *Вопросы детской диетологии*. 2004. №2. С. 25–30.
14. Lauritzen L., Hansen H., Jorgensen M., Michaelsen K. The essentiality of long chain  $\omega$  3 fatty acids in relation to development and function of the brain and retina // *Progress in lipid research*. 2001. Vol. 40. Pp. 1–94.
15. Tovuu A., Zulfugarov I. S., Lee, C.H. Correlations between the temperature dependence of chlorophyll fluorescence and the fluidity of thylakoid membranes // *Physiol. Plant*. 2013. N147. Pp. 409–416.
16. Дударев Л.В., Рудиковская Е.Г., Шмаков В.Н., Арзиев А.Ш., Коненкова Т.А., Саляев Р.К. Особенности действия низкоинтенсивного лазерного излучения на мембраны растительных клеток и клеточных структур // *Устойчивость организмов к неблагоприятным факторам внешней среды : материалы Всерос. научн. конф.* 2009. С. 142–145.
17. Los D.A., Murata N. Structure and expression of fatty acid desaturases // *Biochim. Biophys. Acta*. 1998. Vol. 1394. Pp. 3–15.
18. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Липиды меристем лесобразующих хвойных пород Центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма ЖК фосфолипидов меристем // *Химия растительного сырья*. 2009. №2. С. 71–76.

*Поступило в редакцию 9 февраля 2017 г.*

*После переработки 6 марта 2017 г.*

Kondratenko E.P.<sup>1</sup>, Soboleva O.M.I., Sukhikh A.S.<sup>2\*</sup> INFLUENCE OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE FATTY ACID COMPOSITION OF SEEDLINGS HORDEUM SATIVUM

<sup>1</sup>Kemerovo state agricultural Institute, st. Markovtseva, 5, Kemerovo, 650056 (Russia), e-mail: meer@yandex.ru

<sup>2</sup>Kemerovo state medical university, st. Voroshilova, 22a, Kemerovo, 650029 (Russia)

We investigated the variability of fatty acids in tissues of barley seedlings under the influence of electromagnetic fields of ultrahigh frequency (UHF). The object of research was the seeds of spring varieties of barley seed (*Hordeum sativum* L.). The scheme of experiment included two variants: control – without treatment and electromagnetic irradiation of ultrahigh frequency power of 0.42 kW, 2.45-GHz exposure time 11 sec. In the composition of unsaturated fatty acids in the sprout and roots of seedlings and in the seed coat of barley dominated by polyunsaturated fatty acids – linoleic and linolenic. This causes the high values of the indices of double bonds in the shoots and roots, along with high values of the coefficient of unsaturation in membranes and endosperm. This fact indicates an increase in potential seed viability during processing abiotic stress factor – electromagnetic field of ultrahigh frequency.

Analysis of changes in fatty acids occurring in different organs of seedling showed that in the germ, the endosperm and the shell under the influence of microwave electromagnetic field is reduced content of saturated and, respectively, an increase of unsaturated fatty acids. In roots there was an inverse trend of increasing the amount of saturated and decrease in unsaturated fatty acids. It is established that changes in fatty acid composition of lipids and the activity level of enzymes such as  $\omega$ 9-,  $\omega$ 6 -, and  $\omega$ 3 of desaturase under the influence of electromagnetic fields of ultrahigh frequency also vary according to the organs of seedling. The obtained results give reason to believe that the electromagnetic field of the microwave affects the biosynthesis of fatty acids, lipids and activation of the synthesis of enzymes involved in this process.

**Keywords:** barley, ultrahigh frequency electromagnetic field, fatty acid, unsaturation coefficient, the index of double bonds, desaturase.

### References

1. Kuiper P.J.C. *Dev. Plant Biol.*, 1984, vol. 9, pp. 525–530.
2. Thewke D., Kramer M., Sinensky M.S. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2003, vol. 273, pp. 1–4.
3. Los D.A., Murata N. *Biochim. Biophys. Acta.*, 2004, vol. 1666, pp. 142–157.
4. Arisawa K., Mitsudome H., Yoshida K., Sugimoto S., Ishikawa T., Fujiwara Y., Ichi I. *Biochem. and Biophys. Research Commun.*, 2016, vol. 480, no. 4, pp. 641–647.
5. Il'inskaia L.I., Ozeretskova O.L. *Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiia*, 1998, vol. 34, no. 5, pp. 467–479. (in Russ.).
6. Los' D.A. *Uspekhi biologicheskoi khimii*, 2001, no. 41, pp. 163–198. (in Russ.).
7. Warensjö E., Sundström J., Vessby B., Cederholm T., Risérus U. *J. Clin. Nutr.*, 2008, vol. 88, pp. 203–209.
8. Jeyakumar S.M., Lopamudra P., Padmini S., Balakrishna N. et al. *Metabolism Nutrition & Metabolism*, 2009, vol. 6, pp. 27.
9. Schmid K.M., Ohlogge J. B. *Biochemistry of lipids, lipoproteins and membranes*, 2002, Elsevier Science, pp. 93–126.
10. Zakharova Iu.V., Sukhikh A.S. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 776–783. (in Russ.).
11. Zhivet'ev M.A., Graskova I.A., Dudareva L.V., Stolbikova A.V., Voinikov V.K. *Journal of Stress Physiol. & Biochemistry*, 2010, vol. 6, no. 4, pp. 51–65.
12. Bicalha B., David F., Rumpel K., Kindt E., Sandra P. *J. of Chromatogr. A.*, 2008, vol. 1211, pp. 120–128.
13. Shilin N.M., Kon' I.Ia. *Voprosy detskoj dietologii*, 2004, no. 2, pp. 25–30. (in Russ.).
14. Lauritzen L., Hansen H., Jorgensen M., Michaelsen K. *Progress in lipid research*, 2001, vol. 40, pp. 1–94.
15. Tovuu A., Zulfugarov I. S., Lee, C.H. *Physiol. Plant*, 2013, no. 147, pp. 409–416.
16. Dudarev L.V., Rudikovskaia E.G., Shmakov V.N., Arziev A.Sh., Konenkova T.A., Saliaev R.K. *Ustoichivost' organizmov k neblagopriiatnym faktoram vneshej sredy: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii*. [Stability of organisms to unfavorable factors of the environment: materials of the All-Russian Scientific Conference]. 2009, pp. 142–145. (in Russ.).
17. Los D.A., Murata N. *Biochim. Biophys. Acta*, 1998, vol. 1394, pp. 3–15.
18. Alaudinova E.V., Mironov P.V. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2009, no. 2, pp. 71–76. (in Russ.).

Received February 9, 2017

Revised March 6, 2017

\* Corresponding author.

