

УДК 581.1

КРАТКОВРЕМЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННОГО  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ  
И БИОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОРОСТКОВ  
*Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* И *Thlaspi arvense*

© 2019 г. И. В. Слепцов<sup>а</sup>, М. М. Шашурин<sup>а</sup>, А. Н. Журавская<sup>а, 1</sup>

<sup>а</sup>Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

Поступила в редакцию 12.07.2017 г.

После доработки 14.12.2017 г.

Принята к публикации 14.12.2017 г.

Проведены физиологические, морфологические и биохимические исследования проростков щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.), лофанта тибетского (*Agastache rugosa* (Fisch. & C.A. Mey.) и ярутки полевой (*Thlaspi arvense* L.), после 6-часового воздействия постоянным магнитным полем на их прорастающие семена, с индукцией 50, 80, 100 и 120 мкТл. Проведенные исследования показали, что изученный диапазон интенсивностей магнитного поля не влияет на длину побега и корешка проростков по сравнению с контрольными значениями. Показано волнообразное изменение биохимических показателей (концентрации флавоноидов, малонового диальдегида, суммы низкомолекулярных антиоксидантов, суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот, активности ферментов пероксидазы и супероксиддисмутазы) у проростков трех изученных растений, при шестичасовой обработке их семян постоянным магнитным полем.

**Ключевые слова:** постоянное магнитное поле – флавоноиды – МДА – антиоксиданты – жирные кислоты – ПОК – СОД

**DOI:** 10.1134/S0015330318050159

## ВВЕДЕНИЕ

Все организмы на нашей планете подвергаются непрерывному действию электромагнитных излучений, магнитных и электромагнитных полей естественного происхождения, к которым относится магнитное поле Земли, электростатическое поле атмосферы, космические и солнечные излучения [1]. В настоящее время с развитием технологий усилилось влияние на живые организмы искусственных магнитных и электромагнитных полей, излучений различных частот и мощностей [2]. Влияние искусственного магнитного поля на растения изучено недостаточно, также еще не выявлен принцип и основные механизмы его действия. Известно, что магнитное поле способно влиять на живые организмы, на их рост и развитие [3–5]. Показано, что ответная реакция растительных организмов на действие магнитного поля, в основном зависит от его индук-

ции, времени экспозиции, физиологического состояния растений и т.д. Рядом исследователей показано, что магнитное поле способно оказывать стимулирующее и ингибирующее действие на физиологические, морфологические и биохимические параметры растений [6–9]. Также стоит отметить, что параметры постоянного магнитного поля, которые оказывали стимулирующее действие на определенные характеристики одних видов растений, способствовали их ингибированию у других видов или не вызывали никаких изменений [10, 11].

Цель данной работы – изучить кратковременное воздействие постоянного магнитного поля различной интенсивности на физиологические, морфологические и биохимические характеристики проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве тест-объектов использовали семена щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.), лофанта тибетского (*Agastache rugosa* (Fisch. & C.A. Mey.) и ярутки полевой (*Thlaspi arvense* L.). *Amaranthus retroflexus* и *Thlaspi arvense* – однолет-

*Сокращения:* НМАО – низкомолекулярные антиоксиданты; ПОК – пероксидаза; СОД – супероксиддисмутаз; Тл – Тесла.

<sup>1</sup> Адрес для корреспонденции: Журавская Алла Николаевна, 677980 Якутск, пр. Ленина, 41. Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, электронная почта: jan43@mail.ru

ние, дикорастущие, травянистые растения, широко распространенные на территории Центральной Якутии. *Agastache rugosa* – многолетнее, дикорастущее, травянистое растение, произрастающее в Восточной Азии. Семена были собраны на территории Ботанического сада ИБПК СО РАН (Якутск) в конце августа 2014 года.

Семена проращивали в чашках Петри на фильтровальной бумаге ( $d = 110$  мм) в климатической камере Binder KMF (Германия) при температуре  $25^{\circ}\text{C}$ , с длиной светового дня 16 часов и при относительной влажности 60%. Опыт закладывали в четырех повторностях по 50 семян в каждой чашке для каждого варианта интенсивности магнитного поля. Замоченные на сутки в дистиллированной воде семена подвергали воздействию постоянного магнитного поля с индукцией 50, 80, 100 и 120 мкТл в течение 6 часов.

Для создания постоянного магнитного поля высокой однородности использовали катушки Гельмгольца – систему из двух одинаковых катушек, расположенных на одной оси и на расстоянии, равном их среднему радиусу. Магнитную индукцию в центре системы рассчитывали по формуле [12]:

$$B = \mu_0 \times \left(\frac{4}{5}\right)^2 \frac{IN}{R},$$

где  $\mu_0/\text{м}$  – магнитная постоянная;  $N$  – число витков в каждой катушке;  $I$  – сила тока в катушках;  $R$  – средний радиус катушки.

Лабораторная установка для создания однородного магнитного поля состояла из блока питания с регулированием постоянного напряжения и колец Гельмгольца. Две катушки системы Гельмгольца были соединены последовательно (начало обмотки второй катушки являлось окончанием обмотки первой). Катушки располагались на одной оси на расстоянии равном их среднему радиусу, вдаль от предметов из материалов магнетиков, во избежание искажения однородности и значений создаваемой магнитной индукции. На центральной оси в центре между катушками располагались объекты исследования, подвергавшиеся воздействию МП. Вектор магнитного поля катушек Гельмгольца совпадал с вектором магнитного поля Земли, тем самым образуя комбинированное поле [13].

Для оценки физиологических параметров использовали энергию прорастания (число проросших семян на 3 день, %) и всхожесть семян (число проросших семян на 14 день, %), в качестве морфологических – длину корешка и побега (мм). Определение активности супероксиддисмутазы (СОД, КФ 1.15.1.1; мкмоль/(г<sub>проростка</sub> мин)) проводили по измерению величины молярного коэффициента экстинкции бисформазановых комплексов [14], активность пероксидазы (ПОК,

КФ 1.11.1.7; мкмоль/(г<sub>проростка</sub> мин)) – по стандартной методике окисления о-дианизидина  $\text{H}_2\text{O}_2$  [15]. Определение суммарного содержания низкомолекулярных антиоксидантов (ΣНМАО, мг-экв<sub>кверц</sub>/г<sub>проростка</sub>) проводили по методике, основанной на окрашивании о-фенантролином восстановленного хлорида железа [16]. Интенсивность перекисного окисления липидов определяли по методике, основанной на реакции между малоновым диальдегидом (МДА, мкмоль/г<sub>проростка</sub>) и тиобарбитуровой кислотой [17]. Суммарное содержание жирных кислот (ЖК, мг/г<sub>проростка</sub>) проводили методом кислотного гидролиза на газовом хроматографе “МАЭСТРО” 7820/5975 (Россия), на базе газового хроматографа Agilent 7820 (США) и масс-спектрометрического детектора Agilent 5975 (США) [18]. Концентрацию флавоноидов в проростках определяли в метанольных экстрактах на ВЭЖХ Милихром А-02 фирмы “ЭкоНова” (Россия) [19].

Эксперименты выполняли в четырех биологических и аналитических повторностях. Результаты представлены в виде средней арифметической величины. Абсолютную ошибку рассчитывали из среднеквадратической ошибки с помощью коэффициента Стьюдента при  $P = 0.95$  [20]. Сравнение средних значений выборок проводили методом однократного дисперсионного анализа (ANOVA). Значимость отличий между средними значениями определяли, используя критерий Ньюмена-Кейлса для множественных сравнений при уровне  $p \leq 0.05$ . Расчет проводили с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программа статистического анализа, v.2007.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что обработка семян *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*, в течение 6 часов постоянным магнитным полем с индукцией 50, 80, 100 и 120 мкТл, не вызвала статистически достоверных изменений энергии прорастания и всхожести семян относительно контроля (табл. 1). Что может быть вызвано тем, что воздействие постоянного магнитного поля в течение 6 часов с индукцией 50, 80, 100 и 120 мкТл на семена *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*, является незначительным для изменения физиологических параметров проростков.

При действии постоянного магнитного поля различной интенсивности морфологические характеристики проростков исследуемых видов растений, такие как длина побега и корешка, не изменялись относительно контрольных значений.

Ранее было показано, что действие постоянного магнитного поля в течение 6 часов с индукцией 50 мкТл на *Allium fistulosum* L., способствовало статистически достоверному увеличению на

**Таблица 1.** Физиологические и морфологические характеристики проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* при действии постоянного магнитного поля

Индукция ПМП, мкТл	Энергия прорастания на 3 день, %	Всхожесть на 14 день, %	Длина побега, мм	Длина корешка, мм
<i>Amaranthus retroflexus</i>				
0	39.3 ± 4.5	62.0 ± 4.5	13.5 ± 1.4	45.3 ± 3.5
50	47.0 ± 4.2	66.0 ± 5.0	14.0 ± 1.0	47.0 ± 4.2
80	43.0 ± 3.5	61.0 ± 4.3	14.8 ± 1.3	48.5 ± 4.4
100	40.0 ± 3.9	57.0 ± 3.7	15.8 ± 1.3	49.4 ± 4.1
120	47.0 ± 4.2	66.0 ± 4.7	15.2 ± 1.3	52.6 ± 3.5
<i>Agastache rugosa</i>				
0	28.7 ± 3.7	76.0 ± 2.5	1.8 ± 0.2	47.5 ± 4.6
50	34.7 ± 2.5	77.3 ± 3.7	1.9 ± 0.2	48.5 ± 4.2
80	26.7 ± 1.2	74.7 ± 2.5	2.0 ± 0.1	53.2 ± 4.4
100	28.0 ± 1.2	78.0 ± 2.5	1.9 ± 0.1	53.7 ± 4.4
120	26.0 ± 2.5	74.0 ± 2.5	2.0 ± 0.1	53.6 ± 3.5
<i>Thlaspi arvense</i>				
0	38.7 ± 3.6	88.0 ± 4.1	9.1 ± 0.8	31.7 ± 2.9
50	39.3 ± 3.1	90.0 ± 5.1	8.7 ± 0.6	29.8 ± 3.8
80	32.7 ± 4.2	85.3 ± 1.2	7.9 ± 0.6	35.2 ± 3.9
100	36.7 ± 2.3	83.3 ± 3.1	8.0 ± 0.7	35.8 ± 3.9
120	32.0 ± 4.1	80.7 ± 4.1	9.8 ± 0.5	36.7 ± 3.1

\* Различия статистически значимы по сравнению с контролем при  $p \leq 0.05$

12% всхожести семян, тогда как экспозиции в 1, 4, и 24 часа, не оказывали значимого влияния на этот параметр. Длина корешка исследуемых проростков *Allium fistulosum* уменьшалась на 23–62%, а побега – увеличивалась на 36–63% во всем диапазоне исследованных экспозиций относительно контроля [13]. Такие различия ответной реакции у проростков растений на магнитные поля позволяет предположить существование видоспецифичности воздействия постоянных магнитных полей на растения. Показано, что проростки *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* менее чувствительны к действию постоянного магнитного поля на физиологическом и морфологическом уровнях в сравнении с *Allium fistulosum*.

Известно, что внешнее магнитное поле влияет на образующиеся в процессе метаболизма радикальные пары, что, в свою очередь, приводит к нарушению электронного транспорта и образованию активных форм кислорода в организмах [21].

При воздействии постоянного магнитного поля с индукцией 50, 80 и 100 мкТл, у проростков *Amaranthus retroflexus* увеличилась на 13–30% концентрация малонового диальдегида, а при 120 мкТл исследуемый показатель сохранялся на одном уровне с контролем (табл. 2).

Содержание малонового диальдегида повышалось на 20–58% в клетках проростков *Agastache rugosa* при действии постоянного магнитного поля с индукцией 80, 100 и 120 мкТл, а при 50 мкТл не отличалось от контрольного значения. При действии постоянного магнитного поля у проростков *Thlaspi arvense* повышалась на 12–31% концентрация малонового диальдегида (варианты 80, 100 и 120 мкТл), а при 50 мкТл сохранялась на одном уровне с контролем.

Таким образом, показано, что у проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* при действии постоянного магнитного поля происходит увеличение содержания малонового диальдегида. Это может быть объяснено влиянием магнитного поля на радикальные пары, приводящее к образованию активных форм кислорода и способствующее повышению перекисного окисления липидов, что, в конечном итоге, увеличивает концентрацию малонового диальдегида [21].

В вариантах с индукцией магнитного поля 120 мкТл у проростков *Amaranthus retroflexus*, 50 мкТл – у *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* содержание малонового диальдегида не отличалось от контрольных значений. Стоит отметить, что немонотонное изменение концентрации малонового диальдегида может быть вызвано кратковременным воздействием магнитного поля [22]. Из-

**Таблица 2.** Сумма низкомолекулярных антиоксидантов, концентрация малонового диальдегида, активность пероксидазы и супероксиддисмутазы в проростках *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* при действии постоянного магнитного поля

Индукция ПМП, мкТл	МДА, мкмоль/Г проростка	ΣНМАО, мг-ЭКВ кверцетана/Г проростка	ПОК, мкмоль/Г проростка	СОД, мкмоль/Г проростка
<i>Amaranthus retroflexus</i>				
0	0.086 ± 0.004	0.38 ± 0.03	3.88 ± 0.26	5.49 ± 0.44
50	0.097 ± 0.006	0.51 ± 0.04*	4.08 ± 0.29	6.52 ± 0.72
80	0.106 ± 0.002*	0.64 ± 0.03*	5.18 ± 0.47*	8.37 ± 0.67*
100	0.112 ± 0.007*	0.55 ± 0.03*	6.61 ± 0.39*	9.65 ± 1.06*
120	0.079 ± 0.008	0.42 ± 0.03	3.31 ± 0.47	4.57 ± 0.63
<i>Agastache rugosa</i>				
0	0.055 ± 0.006	1.08 ± 0.05	6.01 ± 0.48	6.66 ± 0.60
50	0.065 ± 0.004	1.23 ± 0.04*	6.22 ± 0.68	6.85 ± 0.55
80	0.067 ± 0.005*	1.32 ± 0.05*	8.26 ± 0.99*	8.41 ± 0.93*
100	0.066 ± 0.004*	1.27 ± 0.07*	9.64 ± 0.58*	12.57 ± 1.76*
120	0.087 ± 0.009*	1.36 ± 0.06*	6.14 ± 0.74	6.13 ± 0.86
<i>Thlaspi arvense</i>				
0	0.084 ± 0.008	0.11 ± 0.01	7.09 ± 0.49	3.12 ± 0.37
50	0.092 ± 0.009	0.16 ± 0.02	7.11 ± 0.15	4.73 ± 0.43*
80	0.094 ± 0.003*	0.24 ± 0.04*	8.50 ± 0.10*	8.03 ± 0.88*
100	0.103 ± 0.008*	0.20 ± 0.04*	8.19 ± 0.38*	5.37 ± 0.75*
120	0.109 ± 0.014*	0.13 ± 0.02	8.18 ± 0.68*	4.43 ± 0.66*

\* Различия статистически значимы по сравнению с контролем при  $p \leq 0.05$

вестно, что магнитное поле вызывает нелинейное изменение уровня перекисного окисления липидов: как стимулирующее, так и ингибирующее действие [23].

Существенный вклад в антиоксидантный статус организма вносят низкомолекулярные антиоксиданты. Индукция постоянного магнитного поля в вариантах 50, 80 и 100 мкТл увеличивала на 34–68% сумму низкомолекулярных антиоксидантов у проростков *Amaranthus retroflexus*, а при 120 мкТл этот параметр оставался на уровне контроля.

Подобным образом этот параметр изменялся и у проростков *Thlaspi arvense* в вариантах 50, 80 и 100 мкТл, то есть повышался в 1.5–2.2 раза, а при 120 мкТл – не отличался от контроля. У проростков *Agastache rugosa* наблюдалось увеличение на 14–26% суммы низкомолекулярных антиоксидантов во всем диапазоне интенсивности магнитного поля.

Таким образом, воздействие постоянного магнитного поля на *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* вызывало увеличение суммы низкомолекулярных антиоксидантов и перекисного окисления липидов в их клетках, кроме *Amaranthus retroflexus* при 120 мкТл, где наблюдалось сохранение на одном уровне с контрольным

значением обоих параметров. А также в клетках проростков *Thlaspi arvense*, где при 120 мкТл повышалось содержание малонового диальдегида, а сумма низкомолекулярных антиоксидантов не отличалась от контроля.

Одними из важнейших низкомолекулярных антиоксидантов растений являются флавоноиды. Основными флавоноидами в *Amaranthus retroflexus* является рутин и кверцетин [24]. В проростках *Amaranthus retroflexus*, произрастающего в Центральной Якутии, был обнаружен только рутин. В клетках проростков *Amaranthus retroflexus* содержание рутина увеличивалось на 26–41% при воздействии постоянного магнитного поля в вариантах с индукцией 50, 80 и 100 мкТл, а при 120 мкТл не отличалось от контрольного значения (табл. 3). Известно, что *Agastache rugosa* содержит семь флавоноидов, четыре из которых являются гликозидами: лютеолин-7-О-, апигенин-7-О-, диосметин-7-О- и акацетин-7-О-гликозид, и три агликона лютеолин, апигенин и акацетин [25]. В проростках *Agastache rugosa* нами было обнаружено два флавоноида: апигенин-7-О-гликозид и апигенин. Содержание апигенина у проростков *Agastache rugosa* увеличивалось на 16–25% в вариантах 80, 100 и 120 мкТл, а при 50 мкТл сохранялось на одном уровне с контролем. Такая же тен-

**Таблица 3.** Концентрация флавоноидов в клетках проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* при действии постоянного магнитного поля

Индукция ПМП, мкТл	<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Agastache rugosa</i>	<i>Thlaspi arvense</i>
	рутин, мг/г проростка	апигенин-7-О-гликозид, мг/г проростка	лютеолин-7-О-гликозид, мг/г проростка
0	0.54 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.09 ± 0.02
50	0.69 ± 0.03*	0.23 ± 0.04	0.22 ± 0.01*
80	0.68 ± 0.02*	0.29 ± 0.02*	0.31 ± 0.03*
100	0.76 ± 0.03*	0.26 ± 0.02*	0.16 ± 0.02*
120	0.48 ± 0.04	0.33 ± 0.03*	0.10 ± 0.02

\* Различия статистически значимы по сравнению с контролем при  $p \leq 0.05$

денция наблюдалась и у апигенин-7-О-гликозида в клетках проростков *Agastache rugosa*. Его концентрация повышалась в 1.6–2.1 раза при действии постоянного магнитного поля с индукцией 80, 100 и 120 мкТл, а при 50 мкТл – статистически достоверно не отличалась от контрольного значения. Известно, что в *Thlaspi arvense* содержится лютеолин-7-гликозид и апигенин-7-гликозид [26]. Но нами в проростках был обнаружен только лютеолин-7-гликозид. При действии постоянного магнитного поля с индукцией 50, 80 и 100 мкТл повышалось в 1.8–3.4 раза содержание лютеолин-7-О-гликозида в клетках проростков *Thlaspi arvense*. А при 120 мкТл данный показатель сохранялся на одном уровне с контролем.

Показано, что исследуемые антиоксиданты изменялись немонотонно в клетках проростков *Amaranthus retroflexus* и *Thlaspi arvense* при различных вариантах индукции магнитного поля. Такой волнообразный эффект может быть вызван кратковременным действием магнитного поля, который выражается в немонотонной ответной реакции организма [22]. Другими авторами [5] показаны схожие результаты при воздействии магнитного поля.

Одними из важнейших составляющих антиоксидантной защиты являются ферменты, такие как пероксидаза и супероксиддисмутаза.

Известно, что некоторые ферменты проявляют магниторецепторные свойства, что проявляется в изменении их активности при воздействии магнитных полей [27]. В проростках *Amaranthus retroflexus* при действии постоянного магнитного поля с индукцией 80 и 100 мкТл наблюдалось увеличение активности ПОК и СОД на 34–70% и 53–76%, соответственно, а при 50 и 120 мкТл исследуемые показатели сохранялись на одном уровне с контрольными значениями (табл. 2). Схожая тенденция наблюдалась у проростков *Agastache rugosa*, при воздействии постоянного магнитного поля с индукцией 80 и 100 мкТл. Повышались активность ПОК и СОД на 37–60% и 26–89%, соответственно, а в вариантах 50 и 120 мкТл данные показатели не отличались от

контрольных значений. Активность ПОК в клетках проростков *Thlaspi arvense* увеличивалась на 15–20% при действии постоянного магнитного поля в вариантах с индукцией 80, 100 и 120 мкТл, а при 50 мкТл сохранялась на одном уровне с контролем. В свою очередь при влиянии постоянного магнитного поля во всем диапазоне индукций активность СОД увеличивалась в 1.4–2.6 раз. Стоит отметить, что максимальная активность ферментов в клетках проростков наблюдалась при 80 и 100 мкТл. Изменение активности СОД и ПОК в клетках проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* может быть связано с особенностью кратковременного действия магнитного поля на регуляцию синтеза ферментов.

Таким образом, показано, что активность СОД и ПОК при воздействии постоянного магнитного поля во всем диапазоне индукций у проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* изменялась немонотонно, это также может быть вызвано кратковременностью и малой интенсивностью действия [22].

Известно, что магнитное поле способно оказывать липотропные эффекты в биологических мембранах, за счет активации различных липаз и вызывать перекисное окисление липидов, вследствие повышения концентрации активных форм кислорода и свободных радикалов [21, 28].

Такие эффекты влияют на жирнокислотный состав растений. Показано, что жирные кислоты являются чувствительными к воздействию слабого постоянного магнитного поля и могут являться его индикаторами [29].

Воздействие постоянного магнитного поля при всех уровнях индукций вызывало повышение суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в клетках проростков *Amaranthus retroflexus* в 1.6–2.0 и 1.7–2.5, *Agastache rugosa* – в 1.7–2.1 и 1.5–1.9 раза и в *Thlaspi arvense* – на 19–43% и 27–48%, соответственно (табл. 4). Стоит отметить, что во всех исследуемых растениях сумма жирных кислот изменялась немонотонно, как и другие

**Таблица 4.** Сумма насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в клетках проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* при действии постоянного магнитного поля

Индукция ПМП, мкТл	<i>Amaranthus retroflexus</i>		<i>Agastache rugosa</i>		<i>Thlaspi arvense</i>	
	ΣSFA, мг/г проростка	ΣUFA, мг/г проростка	ΣSFA, мг/г проростка	ΣUFA, мг/г проростка	ΣSFA, мг/г проростка	ΣUFA, мг/г проростка
0	2.35 ± 0.09	3.18 ± 0.21	2.37 ± 0.15	7.30 ± 0.25	3.66 ± 0.13	7.02 ± 0.42
50	3.68 ± 0.22*	5.45 ± 0.26*	4.41 ± 0.21*	11.68 ± 0.79*	4.73 ± 0.32*	9.78 ± 0.39*
80	4.80 ± 0.14*	7.25 ± 0.27*	4.02 ± 0.13*	11.18 ± 0.53*	4.35 ± 0.21*	8.90 ± 0.56*
100	4.57 ± 0.32*	6.63 ± 0.32*	4.07 ± 0.24*	11.23 ± 0.43*	4.69 ± 0.18*	10.39 ± 0.58*
120	4.72 ± 0.28*	7.98 ± 0.46*	5.03 ± 0.31*	13.90 ± 0.94*	5.22 ± 0.35*	10.20 ± 0.36*

\* Различия статистически значимы по сравнению с контролем при  $p \leq 0.05$

полученные нами показатели (табл. 4). Показано, что при всех примененных нами вариантах интенсивностей магнитного поля, у трех видов растений, увеличивались суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот. Такой эффект может быть связан с ответной реакцией организма и повышенной компенсацией жирных кислот вследствие увеличения перекисного окисления липидов в клетках проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*.

Таким образом, установлено, что при действии постоянного магнитного поля различной интенсивности не изменялись морфологические характеристики проростков исследуемых видов растений (длина побега и корешка) относительно контрольных значений.

Показано, что увеличение содержания малонового диальдегида у проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*, произошло за счет образования активных форм кислорода, которые способствуют повышению перекисного окисления липидов. Установлено, что при всех вариантах магнитного поля, у трех видов растений, увеличивались суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот, что, возможно, связано с ответной реакцией организма и повышенной компенсацией жирных кислот вследствие увеличения перекисного окисления липидов в клетках проростков исследуемых растений.

Воздействие постоянного магнитного поля на проростки *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* вызывало увеличение суммы низкомолекулярных антиоксидантов и перекисного окисления липидов в их клетках. Исключением явились *Amaranthus retroflexus* и *Thlaspi arvense* (120 мкТл), где наблюдалось сохранение на одном уровне с контрольным значением обоих параметров. Исследуемые антиоксиданты изменялись немонотонно в клетках проростков *Amaranthus retroflexus* и *Thlaspi arvense* при различных вариантах индукции магнитного поля. Активность СОД и ПОК при воздействии постоянного магнитного поля во всем диапазоне индукций у проростков

*Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* также изменялась немонотонно. Такой волнообразный эффект может быть вызван кратковременным действием магнитного поля, который выражается в немонотонной ответной реакции организма. Другими авторами наблюдались схожие результаты при воздействии магнитного поля [5]. Полученные данные подтверждают факты исследований о немонотонном характере изменений, вызванных кратковременным и слабым воздействием магнитного поля на растения [22]. Такие эффекты могут быть вызваны магнитными свойствами веществ, содержащихся в исследуемых организмах, которые реагируют специфично на определенные изменения индукции магнитного поля, что в свою очередь провоцирует каскад биохимических реакций, приводящий к немонотонному характеру изменения исследуемых соединений [5, 11, 23].

Работа выполнена в рамках НИР VI.62.1. “Разработка биопрепаратов из тканей растений и животных Якутии на основе изучения особенностей их биохимического состава и механизмов адаптации к условиям Севера” (№ государственной регистрации — АААА-А17-117020110055-3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашурин М.М. Эффекты действия техногенных электромагнитных излучений и полей на живые организмы // Наука и образование. 2015. № 3. С. 83–89.
2. Кривошеин Д.А., Муравей Л.А., Роева Н.Н. Экология и безопасность жизнедеятельности // М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 447 с.
3. Насурлаева З.Ю. Влияние искусственного электромагнитного поля на рассаду // Современные наукоемкие технологии. 2009. № 2. С. 7–11.
4. Беляченко Ю.А., Усанов А.Д., Тырнов В.С., Усанов Д.А. Угасание эффекта стимуляции митотической активности меристем при увеличении сроков хранения сухих семян после экспозиции в низкочастотном магнитном поле // Бюллетень Ботанического

- сада Саратовского университета. 2010. № 9. С. 135–138.
5. Шашури́н М.М., Прокопьев И.А., Шейн А.А., Филиппова Г.В., Журавская А.Н. Ответная реакция подорожника среднего на действие электромагнитного поля промышленной частоты // Физиология растений. 2014. Т. 61. С. 517–521.
  6. Penuelas J., Llusia J., Martinez B., Fontcuberta J. Diamagnetic susceptibility and root growth responses to magnetic fields in *Lens culinaris*, *Glycine soja*, and *Triticum aestivum* // Electromagnetic Biology and Medicine. 2004. V. 23. P. 97–112.
  7. Racuciu M. Influence of extremely low frequency magnetic field on assimilatory pigments and nucleic acids in *Zea mays* and *Cucurbita pepo* seedlings // Romanian Biotechnological Letters. 2012. V. 17. P. 7662–7672.
  8. Dhawi F., Jameel M. Al-Khayri., Essam H. Static magnetic field influence on elements composition in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) // Research Journal of Agriculture and Biological Sciences. 2009. V. 5. P. 161–166.
  9. Belyavskaya N.A. Biological effects due to weak magnetic field on plants // Advances in Space Research. 2004. V. 34. P. 1566–1574.
  10. Huang H.H., Wang S.R. The effects of 60 Hz magnetic fields on plant growth // Nature and Science. 2007. V. 5. № 1. P. 60–68.
  11. Shabrangi A., Majd A. Effect of magnetic fields on growth and antioxidant systems in agricultural plants // PIERS Proceedings, Beijing, China, March. 2009. P. 23–27.
  12. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. Москва: Оникс 21 век, 2005. 464 с.
  13. Шашури́н М.М. Влияние предпосевной обработки семян лука дудчатого (*Allium fistulosum* L.) постоянным магнитным полем на физиологические и биохимические характеристики его проростков // Наука и образование. 2016. Т. 84. № 4. С. 119–123.
  14. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants // Plant Physiol. 1977. V. 59. P. 309–314.
  15. Лебедева О.В., Угарова Н.Н., Березин И.В. Кинетическое изучение реакции окисления (o)-дианизидина перекисью водорода в присутствии пероксидазы из хрена // Биохимия. 1977. Т. 42. С. 1372–1379.
  16. Ермаков А.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.
  17. Владимиров Ю.А., Арчаков А.И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М.: Наука, 1972. 252 с.
  18. Miquel M., Browse J. Arabidopsis mutants deficient in polyunsaturated fatty acid synthesis. Biochemical and genetic characterization of a plant oleoyl-phosphatidylcholine desaturase // Journal of Biological Chemistry. 1992. V. 267. № 3. P. 1502–1509.
  19. Слепцов И.В., Журавская А.Н. Динамика накопления флавоноидов в листьях *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense* собранных в Центральной Якутии // Химия растительного сырья. 2016. № 3. С. 67–72.
  20. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1980. 456 с.
  21. Galland P., Pazur A. Magnetoreception in plants // Journal of Plant Research. 2005. V. 118. № 6. P. 371–389.
  22. Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Мальцева Е.Л. Действие сверхмалых доз биологически активных веществ и низкоинтенсивных физических факторов // Химическая физика. 2003. Т. 22. № 2. С. 390–424.
  23. Wang H.Y., Zeng X.B., Guo S.Y., Li Z.T. Effects of magnetic field on the antioxidant defense system of recirculation-cultured *Chlorella vulgaris* // Bioelectromagnetics. 2008. V. 29. № 1. P. 39–46.
  24. Kalinova J., Dadakova E. Rutin and total quercetin content in amaranth (*Amaranthus* spp.) // Plant foods for human nutrition. 2009. V. 64. № 1. P. 68–74.
  25. Vogelmann J.E. Flavonoids of *Agastache* section *Agastache* // Biochemical systematics and ecology. 1984. V. 12. № 4. P. 363–366.
  26. Llugany M., Tolrà R., Martín S.R., Poschenrieder C., Barceló J. Cadmium induced in glutathione and phenolics of *Thlaspi* and *Noccaea* species differing in Cd accumulation // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2013. V. 176, № 6. P. 851–858.
  27. Pazur A., Schimek C., Galland P. Magnetoreception in microorganisms and fungi // Open Life Sciences. 2007. V. 2. № 4. P. 597–659.
  28. Lee B.-C., Johng H.-M., Lim J.-K., Jeong J.H., Baik K.Y., Nam T.J., Lee J.H., Kim J., Sohn U.D., Yoon G., Shin S., Soh K.S. Effects of extremely low frequency magnetic field on the antioxidant defense system in mouse brain: a chemiluminescence study // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2004. V. 73. № 1. P. 43–48.
  29. Новицкий Ю.И. Липидный состав как индикатор воздействия слабого постоянного магнитного поля на растения // Тезисы III Съезда биофизиков России / Под ред. Рубина А.Б. М.: Институт биофизики клетки. 2004. Т. 2. С. 692–693.