

УДК 58.037

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-283-292>

Оригинальная статья

## Выживаемость и прооксидантно-антиоксидантная система проростков семян растений Якутии, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции

М. М. Шашурин<sup>✉</sup>, А. Н. Журавская

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация  
<sup>✉</sup>[inwertaza@mail.ru](mailto:inwertaza@mail.ru)

### Аннотация

Рассмотрены физиологические и биохимические изменения у проростков дикорастущих растений Якутии, выросших из семян, получивших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции. Обзор литературных источников позволяет заключить, что слабые воздействия низкоинтенсивных полей (нетеплового характера) изучены недостаточно. Исследования проведены на семенах и проростках 14 видов дикорастущих растений Якутии. Критерием оценки воздействия сверхслабого постоянного магнитного поля было образование настоящего листа у проростков (выживаемость). В качестве прооксидантной реакции регистрировали интенсивность процессов перекисного окисления липидов. Суммарное содержание низкомолекулярных антиоксидантов определялось как параметр неферментативной антиоксидантной системы. Изучена активность фермента антиоксидантного действия – супероксиддисмутазы. Оценка влияния сверхслабого постоянного магнитного поля проводилась с использованием метода коэффициентов. Показано, что выживаемость проростков, выросших из семян, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции от 0,2 до 4,0 мТл в течение 24 часов, приводит к активации процессов перекисного окисления липидов и зависит от режима протекания процессов адаптации антиоксидантных систем (суммы низкомолекулярных антиоксидантов и активности супероксиддисмутазы): простой компенсации или гиперкомпенсации. Во втором случае действие сверхслабого постоянного магнитного поля приводит к повышению выживаемости проростков по критерию образования настоящего листа. Работа представляет значимость для специалистов в области магнитобиологии и исследователей антиоксидантных систем растений.

**Ключевые слова:** семена и проростки растений, прооксиданты, антиоксиданты, влияние сверхслабого постоянного магнитного поля, адаптация, прооксидантно-антиоксидантное равновесие

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках проекта «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья, повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (№ 0297-2021-0025, регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР АААА-А21-121012190035-9).

**Для цитирования:** Шашурин М.М., Журавская А.Н. Выживаемость и прооксидантно-антиоксидантная система проростков семян растений Якутии, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):283–292. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-283-292>

Original article

## Survival rates and pro-oxidant-antioxidant systems of germinated Yakutian plant seeds pretreated with super-weak constant magnetic fields of different flux densities

M. M. Shashurin<sup>✉</sup>, A. N. Zhuravskaya

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation  
<sup>✉</sup>[inwertaza@mail.ru](mailto:inwertaza@mail.ru)

### Abstract

The aim of this study was to identify physiological and biochemical changes in seedlings of wild plants of Yakutia, grown from seeds, which have received a pre-sowing, super-weak constant magnetic field treatment of different mag-

netic flux densities. Review of literature sources allows us to conclude that the weak effects of low-intensity fields (nonthermal character) have not been studied sufficiently so far. The study was conducted on seeds from 14 different species of wild plants native to Yakutia. The seeds were subjected to different magnetic flux strengths of 0.2–4.0 mT for 24 hours and then were germinated on filter paper. The criterion for evaluating the effect of the super-weak constant magnetic field was the formation of a true leaf in seedlings (survival rate). The intensity of lipid peroxidation processes was recorded as a pro-oxidant reaction. The total content of low molecular weight antioxidants was determined as an example of the non-enzymatic antioxidant system. The activity of an antioxidant enzyme, superoxide dismutase, was determined. The effects of the super-weak constant magnetic fields were evaluated using regression and statistical methods. Based on the working hypothesis is that the formation of the present leaf is dependent on changes in the pro-oxidant-antioxidant equilibrium in the cells of the seedlings as a result of the action on them by the super-weak constant magnetic field as a function of the magnetic flux density. We showed that the survival rate of seedlings grown from the seeds pre-treated by super-weak constant magnetic fields of different magnetic flux density for 24 hours leads to the activation of lipid peroxidation and depends on the adaptation processes of antioxidant systems (the sum of low-molecular antioxidants and superoxide dismutase activity): simple compensation or hyper-compensation. In the second case, the action of super-weak constant magnetic fields leads to an increase in the survival rate of seedlings by the criterion of the formation of the true leaf. The study is of significance for specialists in magneto-biology and researchers of plant antioxidant systems.

**Keywords:** plant seeds and seedlings, prooxidants, antioxidants, effect of superweak direct magnetic field, adaptation, prooxidant-antioxidant equilibrium

**Funding.** This study was carried out as part of the project “Physiological and biochemical mechanisms of plant, animal and human adaptation to conditions of the Arctic/Subarctic and the development of biopreparations based on natural northern raw materials increasing the efficiency of the adaptation process and the level of human health in extreme environmental conditions” (number 0297-2021-0025, registration number AAAA-121012190035-9).

**For citation:** Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N. Survival rates and pro-oxidant-antioxidant systems of germinated Yakutian plant seeds pretreated with super-weak constant magnetic fields of different flux densities. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):283–292. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-283-292>

## Введение

Данная статья является продолжением ранее опубликованной работы [1], в которой исследованию подлежало пять видов растений при фиксированной индукции постоянного магнитного поля (120 мкТл), развертка по времени от 24 до 120 ч. В настоящей работе число исследуемых видов дикоросов увеличено до 14, время действия магнитного поля – 24 часа, индукция магнитного поля варьировалась от 0,2 до 4 мТл.

Все организмы на нашей планете подвергаются непрерывному действию сверхмалых физических полей искусственного и естественного происхождения. К настоящему времени в области исследования биологического действия слабых магнитных полей накоплен огромный экспериментальный материал, свидетельствующий о высокой чувствительности живых систем к их воздействию [2, 3]. В некоторых пределах интенсивности эти воздействия необходимы для поддержания нормальной жизнедеятельности организма. Растения и животные в ходе эволюции выработали механизмы рецепции информации о состоянии окружающей среды посредством взаимодействия с электромагнитным полем Земли. Малые дозы радиации и магнитного поля могут заметно менять физиологические и биохимиче-

ские характеристики живых организмов [3, 4]. Например, рядом исследователей показано, что ответная реакция растительных организмов на действие магнитного поля (электромагнитного или постоянного) зависит от его характеристики (индукции, частотного диапазона, времени экспозиции и т. д.) и от исходного физиологического состояния растений (семян). Причем в зависимости от характеристик этих факторов их совокупность способна оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие на ряд параметров организмов. Ранее было показано, что сверхслабые магнитные поля способны выступать в качестве мягкого стресс-агента, поэтому их действие на растения может сопровождаться активацией перекисного окисления липидов, обусловленной усилением генерации активных форм кислорода и свободных радикалов, а также, в качестве адаптивной реакции, изменением активности ферментов антиоксидантной защиты [5–8]. В других работах установлено, что магнитное поле и малые дозы радиации не вызывают никаких изменений у некоторых организмов [9]. Публикации по этой тематике отмечаются разнообразием, неоднозначностью, иногда даже противоречивостью полученных данных, не представляющих полной картины исследований в магнитобиоло-

гии как науки, изучающей биологические эффекты магнитных полей. Таким образом, если воздействие на биологические системы электромагнитных полей значительной напряженности (приводящее к тепловым эффектам в биосистемах) исследовано к настоящему времени достаточно полно [3], то слабые воздействия низкоинтенсивных полей (нетеплового характера) пока изучены недостаточно.

Цель данной работы – выявить физиологические и биохимические изменения семенного потомства ряда видов растений Центральной Якутии на разную индукцию сверхслабого постоянного магнитного поля (СПМП).

### Материалы и методы

В качестве тест-объектов использовали семена щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus*), клоповника безлепестного (*Lepidium apetalum* Willd.), полыни чернобыльника (*Artemisia vulgaris*), пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare*), иван-чая узколистного (*Chamaenerion angustifolium*), льна многолетнего (*Linum perenne* L.), подорожника большого (*Plantago major*), дескураньи Софьи (*Descurainia sophia*), кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis*), резухи повислой (*Arabis pendula* L.), скерды кровельной (*Crépis tectorum*), полыни якутской (*Artemisia jacutica* Drob.), пастушьей сумки обыкновенной (*Capsella bursa-pastoris*) и прострела желтеющего (*Pulsatilla orientali-sibirica*), широко распространенных в Центральной Якутии.

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 ч, при относительной влажности 60 %. Опыт закладывали в четырех повторностях по 50 семян в каждой чашке для каждого варианта. Предпосевную обработку СПМП получили сухие семена при разной величине магнитной индукции: 0,2, 0,6, 1,0, 2,0 и 4,0 мТл, в течение 24 ч. Контроль – семена, не прошедшие предпосевную обработку СПМП. Для создания СПМП использовали катушки Гельмгольца, описанные в работе [7].

Критерием оценки воздействия СПМП была выживаемость (образование настоящего листа) проростков на 21-й день наблюдения (%). Появление настоящего листа у проростков говорит о начале активного функционирования апикальной и корневой меристемы – критических тканей растения, которое позволяет зафиксировать

первичные биохимические изменения метаболизма проростка, возможные отдаленные последствия или его гибель.

В качестве прооксидантной реакции регистрировали интенсивность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ), определяемую по методике, основанной на реакции между образующимся в этом процессе малоновым диальдегидом (МДА,  $\text{мкмоль/г}_{\text{пр}}$ ) и тиобарбитуровой кислотой [10]. Суммарное содержание низкомолекулярных антиоксидантов ( $\Sigma\text{НМАО}$ ,  $\text{мг-экв}_{\text{кверц}}/\text{г}_{\text{пр}}$ ), в качестве неферментативной антиоксидантной системы, определяли по методике, основанной на окрашивании о-фенантролином восстановленного хлорида железа [11]. Определение активности фермента антиоксидантного действия – супероксиддисмутазы (СОД, КФ 1.15.1.1) в проростках проводили по измерению величины молярного коэффициента экстинкции бисформазановых комплексов [12].

Оценку влияния СПМП на образование настоящего листа (ОНЛ), интенсивность ПОЛ, активность антиоксидантных систем (как совокупность содержания НМАО и активности СОД) проводили с использованием метода коэффициентов, нормируя значения соответствующих характеристик при различных индукциях СПМП к их значениям в отсутствие СПМП.

Соответствующие показатели вычисляли по следующим формулам:

$$k_{\text{ОНЛ}} = \text{ОНЛ}_i / \text{ОНЛ}_0;$$

$k_{\text{ПОЛ}} = (\text{МДА}_i / \text{МДА}_0)$ , отражает в нормированных единицах активность процесса перекисного окисления липидов;

$k_{\text{АОЗ}} = (\text{НМАО}_i / \text{НМАО}_0 + \text{СОД}_i / \text{СОД}_0) / 2$ , отражает в нормированных к контрольному значению совокупности изменений активность антиоксидантных систем ( $\Sigma\text{НМАО} + \text{СОД}$ ).

Далее, вычисляли коэффициент антиоксидантной защиты:

$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}} = k_{\text{АОЗ}} / k_{\text{ПОЛ}}$ , который в нормированных единицах показывает степень адаптации организма к действию СПМП за счет адаптивных изменений активности антиоксидантных систем в ответ на изменения активности прооксидантных систем, т. е. прооксидантно-антиоксидантное равновесие.

Обсуждение результатов по действию на физиологическое состояние проростков растений, выросших из семян, прошедших предпосевную обработку СПМП, проводили исходя из рабочей гипотезы, заключающейся в том, что выживаемость

мость зависит от изменений прооксидантно-антиоксидантного равновесия в клетках проростков в результате действия на них ПМП разной индукции.

Эксперименты проводили в четырех повторностях. Результаты представлены в виде средней арифметической величины. Абсолютную ошибку рассчитывали из среднеквадратической ошибки с помощью коэффициента Стьюдента при  $p = 0,95$  [13]. Значимость различий 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

В табл. 1 представлены выживаемость и характеристики прооксидантно-антиоксидантной системы клеток проростков растений, выросших из семян, получивших предпосевную обработку сверхслабым ПМП разной индукции. Полученные результаты показали, что у 71,4 % исследованных нами видов растений выживаемость проростков статистически достоверно повышается по мере увеличения индукции ПМП, относительно контроля. Например, при индукции 0,2 мТл наблюдалось увеличение количества выживших проростков от 3 % (резуха вислоплодная) до 45 % (лен многолетний). Предпосевная обработка ПМП сухих семян с индукцией 4,0 мТл повысила выживаемость проростков от 10 % (кровохлебка лекарственная) до 80 % (дескуранья Софьи). Ряд проростков растений (резуха вислоплодная, полынь якутская) снизили выживаемость или остались на уровне контроля (пижма обыкновенная, полынь чернотыльник) в результате предпосевной обработки семян сверхслабым ПМП.

Существенный вклад в антиоксидантный фон организма вносят низкомолекулярные антиоксиданты. Исследование изменений антиоксидантного параметра у проростков клоповника безлепестного, льна многолетнего, дескуранья Софьи, кровохлебки лекарственной, скерды кровельной, иван-чая узколистного и прострела желтеющего показало, что в клетках проростков, выросших из семян, прошедших предпосевную обработку сверхслабым ПМП (по активности супероксиддисмутазы и содержанию низкомолекулярных антиоксидантов) с индуктивностью от 0,2 до 4,0 мТл, было зафиксировано увеличение суммарного содержания НМАО: минимально – у прострела желтеющего (в 1,78 раза) и максим

ально – у дескуранья Софьи (в 6,07 раза), на фоне увеличения выживаемости проростков на 23 и 80 % соответственно относительно контроля. Активировалась СОД, особенно в клетках проростков клоповника безлепестного (в 10,0 раз), полыни чернотыльника (в 6,6 раза) и пижмы обыкновенной (в 5,6 раза) (табл. 2).

У 71,4 % проростков исследованных видов растений зафиксирована активация ПОЛ. Максимально – у резухи вислоплодной в 4,67 раза (4,0 мТл) и у полыни чернотыльника – в 3,0 раза при этой же индукции. Ранее рядом авторов было показано, что действие сверх- и низкоинтенсивных факторов среды (запыление, сверхслабые статические магнитные поля, малые дозы ионизирующего излучения и др.) приводит к увеличению суммы низкомолекулярных антиоксидантов, концентрации малонового диальдегида, активности пероксидазы и супероксиддисмутазы в клетках организмов растений [7, 14]. Было предположено, что увеличение суммы НМАО, активности пероксидазы и СОД в клетках вызвано ответной реакцией на повышение интенсивности ПОЛ. Это можно объяснить влиянием магнитного поля на радикальные пары, приводящим к образованию активных форм кислорода и способствующим повышению перекисного окисления липидов, что, в конечном итоге, увеличивает концентрацию малонового альдегида [16, 17]. Анализ значений антиоксидантно/прооксидантных соотношений ( $k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$ ) показал, что значительное количество клеток проростков (71,4 %) адаптировались к действию сверхмалого ПМП за счет увеличения суммарного содержания низкомолекулярных антиоксидантов и благодаря активации СОД в режиме гиперкомпенсации (см. табл. 2). Максимальное значение  $k_{\text{АОЗ/ПОЛ}} = 6,65$  – у проростков щиряцы запрокинутой при индукции ПМП 4,0 мТл.

Вместе с тем антиоксидантные системы в клетках проростков ряда растений (подорожник большой, пижма обыкновенная, резуха вислоплодная, полынь якутская, пастушья сумка) адаптировались к действию сверхслабого ПМП на семена при индукции 4,0 мТл в режиме простой компенсации,  $k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$  составил 0,66, 1,14, 0,39, 0,63, 0,85 соответственно.

### Выводы

Проростки, выросшие из семян, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоян

**Выживаемость проростков, суммарное содержание антиоксидантов, активность СОД и интенсивность процессов перекисного окисления липидов (по МДА) у проростков при разной индукции воздействия ПМП на семена растений ( $p \leq 0,1$ ;  $p \leq 0,01$ )**

Table 1

**Seedling survival, total antioxidant content, SOD activity, and intensity of lipid peroxidation processes (according to MDA) in seedlings at different induction of PMF exposure to plant seeds ( $p \leq 0,1$ ;  $p \leq 0,01$ )**

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
<b>Щирица запрокинутая – <i>Amaránthus retrofléxus</i></b>						
Выживаемость, %	30,0±3,0	27,0±2,7	33,0±3,3	40,0±4,0	45,0±4,5	50,0±5,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	10,8±0,1	10,6±0,1	10,7±0,1	10,0±0,1	28,1±0,3	10,6±0,1
СОД, мкМ/Г·мин.	20,0±0,2	22,0±0,2	26,0±0,2	38,0±0,4	45,0±0,4	156,0±1,5
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	0,6±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,5±0,01	0,4±0,01
<b>Клоповник безлепестный – <i>Lepidium apetalum</i> Willd.</b>						
Выживаемость, %	73,0±7,3	72,0±7,2	75,0±7,5	80,0±8,0	82,0±8,2	90,0±9,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	20,5±0,2	20,5±0,2	30,6±0,3	50,5±0,5	56,3±0,6	104,4±1,0
СОД, мкМ/Г·мин.	12,0±0,01	16,0±0,01	15,0±0,01	36,0±0,04	50,0±0,05	120,0±1,2
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	0,3±0,01	0,3±0,01	0,4±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01
<b>Лен многолетний – <i>Linum perenne</i> L.</b>						
Выживаемость, %	29,0±2,9	42,0±4,2	46,0±4,6	48,0±4,8	52,0±5,2	50,0±5,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	40,4±0,4	40,2±0,4	40,3±0,4	40,5±0,4	80,6±0,8	90,5±0,9
СОД, мкМ/Г·мин.	20,6±0,2	22,8±0,2	30,4±0,3	60,2±0,6	60,8±0,6	60,6±0,6
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	0,6±0,01	0,4±0,01	0,5±0,01	0,5±0,01	0,4±0,01	0,5±0,01
<b>Подорожник большой – <i>Plantágo májor</i></b>						
Выживаемость, %	15,0±1,5	17,0±1,7	16,0±1,6	16,0±1,6	18,0±1,8	18,0±1,8
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	33,2±0,3	33,3±0,3	33,0±0,3	33,2±0,3	33,2±0,3	33,1±0,3
СОД, мкМ/Г·мин.	10,4±0,1	10,4±0,1	12,0±0,1	10,4±0,1	10,2±0,1	10,4±0,1
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	1,8±0,02	2,0±0,02	1,9±0,02	1,9±0,02	1,9±0,02	2,7±0,03
<b>Дескуранья Софьи – <i>Descurainia sophia</i></b>						
Выживаемость, %	26,0±2,6	24,0±2,4	27,0±2,7	24,0±2,4	42,0±4,2	47,0±4,7
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	42,2±0,4	42,2±0,4	42,3±0,4	44,2±0,4	100,0±1,0	256,3±2,4
СОД, мкМ/Г·мин.	15,8±0,2	16,0±0,2	18,0±0,2	24,0±0,2	30,6±0,3	40,2±0,4
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	0,3±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,4±0,01
<b>Пижма обыкновенная – <i>Tanacétum vulgáre</i></b>						
Выживаемость, %	44,0±4,4	37,8±3,8	42,0±4,2	46,0±4,6	47,0±4,7	40,0±4,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	42,4±0,4	42,7±0,4	42,1±0,4	42,2±0,4	36,2±0,4	52,6±0,5
СОД, мкМ/Г·мин.	10,0±0,1	12,0±0,1	12,0±0,1	34,0±0,3	48,0±0,5	56,0±0,6
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	15,0±0,1	16,0±0,1	16,0±0,1	28,0±0,3	36,0±0,4	45,0±0,5
<b>Польнь чернотыльник – <i>Artemisia vulgáris</i></b>						
Выживаемость, %	46,0±4,6	44,8±4,5	49,0±4,9	50,0±5,0	30,0±3,0	25,0±2,5
ΣНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	3,7±0,4	3,7±0,4	3,7±0,4	3,7±0,4	3,5±0,4	3,4±0,3
СОД, мкМ/Г·мин.	30,2±0,3	32,0±0,3	34,0±0,3	34,4±0,3	60,8±0,6	124,0±1,2
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	10,4±0,1	10,4±0,1	10,5±0,1	20,5±0,2	30,5±0,3	40,4±0,4

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
<b>Кровохлебка лекарственная – <i>Sanguisorba officinalis</i></b>						
Выживаемость, %	19,0±1,9	22,0±2,2	24,0±2,4	30,0±3,0	22,0±2,2	22,0±2,2
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	4,9±0,1	5,0±0,1	15,0±0,2	25,0±0,3	17,2±0,2	15,8±0,2
СОД, мкМ/Г·мин.	10,2±0,1	12,0±0,1	16,8±0,1	30,4±0,3	24,0±0,2	22,0±0,2
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	0,6±0,01	0,5±0,01	0,6±0,01	0,7±0,01	0,8±0,01	0,6±0,01
<b>Резуха вислоплодная – <i>Arabis pendula</i> L.</b>						
Выживаемость, %	60,0±6,0	62,0±6,2	60,0±6,0	58,0±5,8	54,0±5,4	50,0±5,0
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	275,0±2,7	270,0±2,7	250,0±2,5	300,0±3,0	300,0±3,0	300,0±3,0
СОД, мкМ/Г·мин.	20,2±0,2	22,0±0,2	22,0±0,2	22,0±0,2	34,0±0,3	52,0±0,5
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	1,2±0,01	1,4±0,01	1,6±0,01	2,2±0,02	3,4±0,03	5,6±0,06
<b>Скерда кровельная – <i>Crépis tectorum</i></b>						
Выживаемость, %	80,0±8,0	92,0±9,2	92,0±9,2	94,0±9,4	98,0±9,8	98,0±9,8
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	98,0±1,0	96,0±1,0	98,0±1,0	102,0±1,0	160,0±1,6	180,0±1,8
СОД, мкМ/Г·мин.	10,0±0,1	12,0±0,1	14,0±0,1	20,0±0,2	31,8±0,3	40,5±0,4
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	5,4±0,05	5,6±0,05	5,4±0,05	6,0±0,06	6,8±0,07	7,8±0,08
<b>Полынь якутская – <i>Artemisia jacutica</i> Drob.</b>						
Выживаемость, %	56,0±5,6	60,0±6,0	58,0±5,8	52,0±5,2	48,0±4,8	36,0±3,6
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	176,0±1,7	180,0±1,8	180,0±1,8	186,0±1,8	160,0±1,6	158,0±1,6
СОД, мкМ/Г·мин.	0,3±0,003	0,3±0,003	0,2±0,002	0,2±0,002	0,3±0,003	0,3±0,003
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	4,8±0,05	4,6±0,05	4,6±0,05	4,8±0,05	5,8±0,06	7,2±0,07
<b>Пастушья сумка – <i>Capsella bursa-pastoris</i></b>						
Выживаемость, %	38,2±3,8	38,0±3,8	40,0±4,0	46,4±4,6	54,2±5,4	56,0±5,6
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	143,0±1,4	142,6±1,4	142,8±1,4	154,0±1,5	240,0±2,4	266,0±2,7
СОД, мкМ/Г·мин.	0,4±0,004	0,3±0,003	0,3±0,003	0,4±0,004	0,3±0,003	0,4±0,004
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	3,8±0,04	4,0±0,04	3,8±0,04	4,8±0,05	5,2±0,05	6,4±0,06
<b>Иван-чай узколистный – <i>Chamaenerion angustifolium</i></b>						
Выживаемость, %	56,0±5,6	63,8±6,4	66,2±6,6	64,9±6,5	67,8±6,8	66,5±6,7
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	95,0±1,0	95,0±1,0	98,0±1,0	240,0±2,0	300,0±3,0	320,0±3,0
СОД, мкМ/Г·мин.	86,0±0,9	86,0±0,9	88,0±0,9	140,0±1,4	180,0±1,8	260,0±2,6
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	1,5±0,02	1,7±0,02	1,5±0,02	1,6±0,02	2,8±0,03	3,6±0,04
<b>Прострел желтеющий – <i>Pulsatilla orientáli-sibíríca</i></b>						
Выживаемость, %	12,0±1,2	14,0±1,4	13,0±1,3	15,0±1,5	16,0±1,6	18,0±1,8
ШНМАО, мкг-ЭКВ <sub>кверц</sub> /Г <sub>проростка</sub>	100,0±1,0	98,6±1,0	102,0±1,0	138,0±1,4	180,6±1,8	178,0±1,8
СОД, мкМ/Г·мин.	0,2±0,002	0,2±0,002	0,2±0,002	0,2±0,002	0,3±0,003	0,4±0,004
МДА, мкМ/Г <sub>проростка</sub>	2,8±0,03	3,0±0,03	2,9±0,03	3,5±0,03	4,0±0,04	4,2±0,04

ным магнитным полем с индукцией от 0,2 до 4,0 мТл в течение 24 ч, характеризуются повышенным уровнем процессов перекисного окисления липидов. В зависимости от интенсивности антиоксидантных процессов (суммы низкомолекулярных антиоксидантов и активности супероксиддисмутазы), адаптация проростков проходит в режиме простой или гиперкомпенсации. В слу-

чае гиперкомпенсации происходит повышение выживаемости проростков. Эти эффекты могут быть вызваны магнитными свойствами веществ (молекулы воды, ионы железа, кальция и др.), содержащихся в клетках исследуемых организмов, которые реагируют специфично на изменения индукции сверхмалого ПМП, и приводят к появлению каскада биохимических реакций.

**Расчетные значения (коэффициенты) образования настоящего листа, суммарного содержания антиоксидантов, активности СОД и интенсивности перекисного окисления липидов у проростков при разной интенсивности воздействия сверхслабым ПМП на семена растений ( $p \leq 0,1$ ;  $p \leq 0,01$ )**

Table 2

**Estimated values (coefficients) of true leaf formation, total content of antioxidants, SOD activity and intensity of lipid peroxidation in seedlings at different intensity of exposure to superweak PMF on plant seeds ( $p \leq 0.1$ ;  $p \leq 0.01$ )**

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
<i>Щирица запрокинутая – Amaranthus retrofléxus</i>						
$k_{ОНЛ}$	1,0	0,9	1,1	1,33	1,5	1,67
$k_{НМАО}$	1,0	0,98	0,99	0,92	2,6	0,98
$k_{СОД}$	1,0	1,1	1,3	1,9	2,25	7,8
$k_{ПОЛ}$	1,0	0,66	0,66	0,66	0,83	0,66
$k_{АОЗ/ПОЛ}$	1,0	1,57	1,78	2,14	2,92	6,65
<i>Клоповник безлепестный – Lepidium apetalum Willd.</i>						
$k_{ОНЛ}$	1,0	0,99	1,03	1,1	1,12	1,23
$k_{НМАО}$	1,0	1,0	1,49	2,46	2,75	5,09
$k_{СОД}$	1,0	1,33	1,25	3,0	4,17	10,0
$k_{ПОЛ}$	1,0	1,0	1,33	1,0	1,0	1,0
$k_{АОЗ/ПОЛ}$	1,0	1,16	1,03	2,73	3,46	5,25
<i>Лен многолетний – Linum perenne L.</i>						
$k_{ОНЛ}$	1,0	1,45	1,59	1,65	1,79	1,72
$k_{НМАО}$	1,0	0,99	0,99	1,0	1,99	2,24
$k_{СОД}$	1,0	1,1	1,47	2,98	2,95	2,94
$k_{ПОЛ}$	1,0	0,66	0,83	0,83	0,66	0,83
$k_{АОЗ/ПОЛ}$	1,0	1,58	1,48	1,79	3,74	3,12
<i>Подорожник большой – Plantágo májor</i>						
$k_{ОНЛ}$	1,0	1,13	1,07	0,94	1,2	1,2
$k_{НМАО}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,97
$k_{СОД}$	1,0	1,0	1,15	1,0	0,98	1,0
$k_{ПОЛ}$	1,0	1,1	1,05	1,05	1,05	1,5
$k_{АОЗ/ПОЛ}$	1,0	0,9	1,0	0,95	0,94	0,66
<i>Дескуранья Софьи – Descurainia sophia</i>						
$k_{ОНЛ}$	1,0	0,92	1,04	0,92	1,61	1,8
$k_{НМАО}$	1,0	1,0	1,0	1,04	2,37	6,07
$k_{СОД}$	1,0	1,01	1,14	1,52	1,93	2,54
$k_{ПОЛ}$	1,0	1,33	1,33	1,0	1,0	1,33
$k_{АОЗ/ПОЛ}$	1,0	0,75	0,8	1,28	2,15	3,28
<i>Пижма обыкновенная – Tanacétum vulgáre</i>						
$k_{ОНЛ}$	1,0	0,86	0,95	1,04	1,07	0,9
$k_{НМАО}$	1,0	1,12	0,99	0,99	0,83	1,24
$k_{СОД}$	1,0	1,2	1,2	3,4	4,8	5,6
$k_{ПОЛ}$	1,0	1,07	1,07	1,87	2,4	3,0
$k_{АОЗ/ПОЛ}$	1,0	1,08	1,02	1,17	1,17	1,14

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Польнь чернوبильник – <i>Artemisia vulgaris</i>						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	0,86	0,95	1,04	1,07	0,9
k <sub>НМАО</sub>	1,0	1,12	0,99	0,99	0,83	1,24
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,2	1,2	3,4	4,8	6,6
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	1,07	1,07	1,87	2,4	3,0
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	1,08	1,02	1,17	1,17	1,14
Кровохлебка лекарственная – <i>Sanguisorba officinalis</i>						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	1,16	1,26	1,58	1,16	1,16
k <sub>НМАО</sub>	1,0	1,02	3,06	5,1	3,51	3,22
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,18	1,64	2,98	2,35	2,16
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	0,83	1,0	1,17	1,33	1,0
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	1,32	2,35	3,45	2,2	2,69
Резуха вислоплодная – <i>Arabis pendula</i> L.						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	1,03	1,0	0,97	0,9	0,83
k <sub>НМАО</sub>	1,0	0,98	0,91	1,02	1,09	1,09
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,09	1,09	1,09	1,68	2,57
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	1,17	1,33	1,83	2,83	4,67
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	0,88	0,75	0,58	0,49	0,39
Скерда кровельная – <i>Crépis tectorum</i>						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	1,15	1,15	1,18	1,23	1,23
k <sub>НМАО</sub>	1,0	0,98	1,0	1,04	1,63	1,84
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,2	1,4	2,0	3,18	4,05
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	1,04	1,0	1,11	1,26	1,44
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	1,05	1,2	1,37	1,9	2,05
Польнь якутская – <i>Artemisia jacutica</i> Drob.						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	1,07	1,04	0,93	0,86	0,64
k <sub>НМАО</sub>	1,0	1,02	1,02	1,06	0,9	0,9
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,0	0,67	0,67	1,0	1,0
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	0,96	0,96	1,0	1,21	1,5
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	1,05	0,88	0,87	0,79	0,63
Пастушья сумка – <i>Capsella bursa-pastoris</i>						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	0,99	1,05	1,21	1,42	1,46
k <sub>НМАО</sub>	1,0	0,99	0,99	1,08	1,68	1,86
k <sub>СОД</sub>	1,0	0,75	0,75	1,0	0,75	1,0
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	1,05	1,0	1,26	1,37	1,68
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	0,83	0,87	0,82	0,88	0,85
Иван-чай узколистный – <i>Chamaenérion angustifolium</i>						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	1,18	1,16	1,75	1,21	1,19
k <sub>НМАО</sub>	1,0	1,0	1,03	2,53	3,16	3,37
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,0	1,02	1,63	2,09	3,02
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	1,13	1,0	1,07	1,87	2,4
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	0,88	1,03	1,95	1,4	1,33

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Прострел желтеющий – <i>Pulsatilla orientali-sibirica</i>						
k <sub>ОНЛ</sub>	1,0	1,17	1,08	1,25	1,33	1,5
k <sub>НМАО</sub>	1,0	0,98	1,02	1,38	1,8	1,78
k <sub>СОД</sub>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	2,0
k <sub>ПОЛ</sub>	1,0	1,07	1,04	1,25	1,43	1,5
k <sub>АОЗ/ПОЛ</sub>	1,0	0,93	0,97	0,95	1,15	1,26

### Список литературы / References

- Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N. Prooxidant-antioxidant system of plants grown from seeds treated with a constant magnetic field. *Журнал физиологии и биохимии стресса = Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2023;19(1):43–48. (In Russ.)
- Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. *Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире*. Киев: Наукова думка; 1992. 187 с.  
Temuryants N.A., Vladimirskiy B.M., Tishkin O.G. Microwave electromagnetic signals in the biological world. Kiev: Naukova Dumka; 1992. 187 p. (In Russ.)
- Бинги В.Н. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы. *Успехи физических наук*. 2003;173(3):265–300. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200303b.0265>  
Bingi V.N. Physical problems of the action of weak magnetic fields on biological systems. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2003;173(3):265–300. (In Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200303b.0265>
- Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Голошапов А.Н., Жижина Г.П. Новые аспекты закономерностей действия низкоинтенсивного облучения в малых дозах. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1999;39(1):26–34.  
Burlakova E.B., Konradov A.A., Goloshapov A.N., Zhizhina G.P. New aspects of regularity action of low intensity radiation. *Radiation biology. Radioecology*, 1999; 39(1):26–34. (In Russ.)
- Сердюков Ю.А., Новицкий Ю.И. Действие слабого постоянного магнитного поля на активность антиоксидантных ферментов у проростков редиса. *Физиология растений*. 2013;1(60):66–75. <https://doi.org/10.7868/S0015330313010065>  
Serdyukov Yu.A., Novickiy Yu.I. Effect of a weak constant magnetic field on the activity of antioxidant enzymes in radish seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2013;1(60):66–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0015330313010065>
- Shabrangi A., Majd A., Sheidai M., Nabyouni M., Dorranean D. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on the antioxidant enzymes activity of C3 and C4 plants. *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Cambridge, USA, 2010; 1083–1087.
- Слепцов И.В., Шашурин М.М., Журавская А.Н. Кратковременное воздействие постоянного магнитного поля на физиологические, морфологические и биохимические характеристики проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*. *Физиология растений*. 2019;1(66):66–72. <https://doi.org/10.1134/S0015330318050159>  
Slepcev I.V., Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N. Short-term exposure to a constant magnetic field on the physiological, morphological, and biochemical characteristics of *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa*, and *Thlaspi arvense* seedlings. *Plant physiology*. 2019;1(66):66–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330318050159>
- Барышев М.Г., Касьянов Г.И. Воздействие электромагнитных полей на биохимические процессы в семенах растений. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2002;1:21–23.  
Baryshev M.G., Kasyanov G.I. Effect of electromagnetic fields on biochemical processes in plant seeds. *Izvestiya vuzov. Pishhevaya tehnologiya*. 2002;1:21–23. (In Russ.)
- Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Шихлярова А.И., Кузьменко Т.С., Барсукова Л.П., Марьяновская Г.Я., Шейко Е.А., Евстратова О.Ф., Жукова Г.В. Магнитные поля, адаптационные реакции и самоорганизация живых систем. *Биофизика*. 1996;1(41):898–905.  
Garkavi L.I., Kvakina E.B., Shihlyarova A.I., Kuzmenko T.S., Barsukova L.P., Maryanovskaya G.Ya., Shejko E.A., Evstratova O.F., Zhukova G.V. Magnetic fields, adaptive reactions and self-organization of living systems. *Biophysics*. 1996;1(41):898–905. (In Russ.)
- Ермаков А.И. *Методы биохимического исследования растений*. Л.: Агропромиздат; 1987. 430 с.  
Ermakov A.I. *Methods of biochemical research of plants*. Leningrad: Agropromizdat; 1987. 430 p. (In Russ.)
- Лебедева О.В., Угарова Н.Н., Березин И.В. Кинетическое изучение реакции окисления о-дианизидина перекисью водорода в присутствии пероксидазы из хрена. *Биохимия*. 1977;7(42):1372–1379.  
Lebedeva O.V., Ugarova N.N., Berezin I.V. Kinetic study of the oxidation reaction of o-dianisidine with hydrogen peroxide in the presence of horseradish

- peroxidase. *Biochemistry*. 1977;7(42):1372–1379. (In Russ.)
12. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide Dismutases: I. Occurrence in Higher Plants. *Plant Physiology*. 1977;59:309–314.
13. Лакин Г.Ф. *Биометрия*. М.: Высшая школа; 1980. 293 с.  
Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1980. 293 p. (In Russ.)
14. Prokop'ev I.A., Filippova G.V., Shein A.A., Gabyshev D.V. Impact of urban anthropogenic pollution on seed production, morphological and biochemical characteristics of chamomile, *Matricaria chamomila* L. *Russian journal of ecology*. 2014;1(45):18–23. <https://doi.org/10.1134/S106741361306009X>
15. Sytar O., Kumar A., Latowski D., Kuczynska P., Strzałka K., Prasad M.N.V. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013;(35):985–999. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1169-6>
16. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci*. 2002;(7):405–410.
17. Galland P., Pazur A. Magnetoreception in plants. *Journal of Plant Research*. 2005;6(118):371–389. <https://doi.org/10.1007/s10265-005-0246-y>

#### Об авторах

ШАШУРИН Михаил Михайлович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6785-1948>, AuthorID: 157342, e-mail: [inwertaza@mail.ru](mailto:inwertaza@mail.ru)

ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, AuthorID: 88427, e-mail: [jan43@mail.ru](mailto:jan43@mail.ru)

#### About the authors

SHASHURIN, Mikhail Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, AuthorID: 157342, <https://orcid.org/0000-0002-6785-1948> e-mail: [inwertaza@mail.ru](mailto:inwertaza@mail.ru)

ZHURAVSKAYA, Alla Nikolaevna, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, AuthorID: 88427, e-mail: [jan43@mail.ru](mailto:jan43@mail.ru)

Поступила в редакцию / Submitted 14.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.05.2023

Принята к публикации / Accepted 23.05.2023