

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-1-1091

EDN: RMMLRB

УДК 581.1:57.043



Научная статья

**ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРОКСИД
АНИОН-РАДИКАЛА В ЛИСТЬЯХ ПШЕНИЦЫ МЯГКОЙ
(*TRITICUM AESTIVUM* L.) ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ**

О.В. Бледных, Н.А. Роденко, В.А. Глушечков, Ю.В. Дегтева

Аннотация

Обоснование. В настоящее время научным сообществом накоплен большой объём данных освещающих действие на биологические объекты переменных, постоянных и импульсных магнитных полей (ИМП) низкой напряжённости и индукции порядка $B=0,1$ Тл как фактора, запускающего окислительный стресс и приводящего к развитию через ряд биохимических реакций ответа на их воздействие. Действие же импульсных магнитных полей высокой напряженности и индукции от 0,1 Тл и выше на биологические объекты на сегодняшний день практически не изучены.

Цель исследования – изучить влияние импульсных магнитных полей высокой напряженности индукцией от 0,1 Тл на генерацию супероксид анион-радикала в листьях пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L. как ответной реакции на данное воздействие.

Материалы и методы. Объектами исследования служили девятисуточ-ные зеленые и этилированные ростки пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L. выращенные на дистиллированной воде. Обработка импульсным магнитным полем проводилась на специально сконструированной экспериментальной установке МИУ-БИО-5 с использованием многовиткового индуктора для обработки биообъектов в пробирках объемом 25 мл. Генерацию супероксид

анион-радикала регистрировали спектрофотометрическим методом при длине волны 480 нм, на основании донорно-акцепторной реакции окисления адреналина до адренохрома.

Результаты. В исследовании показано, что в результате воздействия импульсного магнитного поля высокой напряжённости на зеленые ростки пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L. после 60 минутной выдержки при искусственном освещении 1600 лк, генерация супероксид анион-радикала при действии ИМП индукцией $B=0,53$ Тл, $B=3,71$ Тл и $B=5,21$ Тл равнялась контрольному значению $2,17 \pm 0,14$ μM , а при воздействии ИМП индукцией $B=2,21$ Тл отмечено снижение генерации до $1,69 \pm 0,14$ $\mu\text{M}/\text{г}$, что ниже контрольного значения в 1,3 раза. Во втором эксперименте с этилированными ростками после 60 минутной выдержки в темноте, наблюдалось снижение генерации супероксид анион-радикала по отношению к контролю равного $1,53 \pm 0,21$ $\mu\text{M}/\text{г}$: при воздействии ИМП индукцией $B=0,53$ Тл генерация составила $1,21 \pm 0,14$ $\mu\text{M}/\text{г}$, что меньше контроля в 1,3 раза; при воздействии ИМП индукцией $B=2,21$ Тл генерация составила $1,12 \pm 0,16$ $\mu\text{M}/\text{г}$, что меньше контроля в 1,4 раза; при воздействии ИМП индукцией $B=3,71$ Тл генерация составила $1,21 \pm 0,24$ $\mu\text{M}/\text{г}$, что меньше контроля в 1,3 раза; при воздействии ИМП индукцией $B=5,21$ Тл генерация составила $1,13 \pm 0,08$ $\mu\text{M}/\text{г}$, что меньше контроля в 1,4 раза. Так же был проведен третий эксперимент с целью установить зависимость генерации супероксид анион-радикала зелеными ростками от времени после воздействия ИМП индукцией $B=2,21$ Тл при дневном освещении 800 лк. В ходе третьего эксперимента был получен следующий результат: до воздействия ИМП генерация супероксид анион-радикала составляла $1,69 \pm 0,24$ $\mu\text{M}/\text{г}$, через 15 минут после воздействия отмечено усиление генерации до $1,77 \pm 0,29$ $\mu\text{M}/\text{г}$, еще через 15 минут значение генерации оставалось высоким и равнялось $1,77 \pm 0,16$ $\mu\text{M}/\text{г}$ но отмечалась тенденция к снижению, через 60 минут отмечено снижение генерации до значения $1,61 \pm 0,21$ $\mu\text{M}/\text{г}$, а через 24 часа значение генерации вернулось к контрольному $1,69 \pm 0,14$ $\mu\text{M}/\text{г}$. Результат третьего эксперимента показывает что ИМП индукцией $B=2,21$ Тл может выступать как фактор приводящий к развитию окислительного стресса у растений. Но за счёт запуска антиоксидантных механизмов через час после воздействия развившийся окислительный стресс нивелируется.

Закключение. Полученные в ходе трех экспериментов данные позволили выдвинуть гипотезу, что ИМП оказывает воздействие на растения как стресс-фактор провоцирующий усиление генерации супероксид анион-радикала, а также приводит к активации антиоксидантной системы защиты растений и к её усилению. Для подтверждения выдвинутой гипотезы предлагается

провести ряд дополнительных экспериментов с целью установить влияние ИМП на генерацию пероксида водорода, и активность фермента супероксид-дисмутазы.

Ключевые слова: пшеница мягкая; *Triticum aestivum* L.; зеленые ростки; этиолированные ростки; растения; супероксид анион-радикал; импульсное магнитное поле высокой напряжённости; ИМП; индукция; индуктор; экспериментальная установка; генерация; гипотеза

Для цитирования. Бледных, О. В., Роденко, Н. А., Глушченков, В. А., & Дегтева, Ю. В. (2025). Генерация супероксид анион-радикала в листьях пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) под воздействием импульсного магнитного поля высокой напряженности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 50-69. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1091>

Original article

GENERATION OF SUPEROXIDE ANION-RADICAL IN LEAVES OF SOFT WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) UNDER THE ACTION OF A HIGH-INTENSITY PULSED MAGNETIC FIELD

O.V. Blednyh, N.A. Rodenko, V.A. Glushchenkov, Ju.V. Degteva

Background

Currently, the scientific community has accumulated a large amount of data covering the action on biological objects of alternating, constant and pulsed magnetic fields (PMF) of low intensity and induction of the order of $B=0.1$ Tl as a factor that triggers the oxidative stress and through a series of biochemical reactions leads to the development of a response to the effect of these fields. But the action of high-intensity pulsed magnetic fields with induction from 0.1Tl and higher on biological objects has not been studied to date.

The **purpose** of this study is to study the effect of high-intensity pulsed magnetic fields with induction from 0.1 Tl on the generation of superoxide anion-radicals in leaves of soft wheat *Triticum aestivum* L. as a response to this action.

Materials and methods. The objects of the study were nine-day-old green and etiolated wheat sprouts of soft wheat *Triticum aestivum* L., grown in distilled water. Processing by a pulsed magnetic field was carried out on a specially designed experimental installation MIU-BIO-5 using a multi-turn inductor for treatment of biological objects in 25 ml test-tubes. The generation of superoxide anion-radicals

was recorded spectrophotometrically at a wavelength of 480 nm, based on the donor-acceptor reaction of oxidation of adrenaline to adrenochrome.

Results. The study showed that as a result of exposure to a high-intensity pulsed magnetic field, hereinafter referred as PMF, on green sprouts of soft wheat *Triticum aestivum* L. after a 60-minute exposure under artificial lighting of 1600 lux, the generation of superoxide anion-radical under the action of the PMF with induction of $B=0.53$ Tl, $B=3.71$ Tl and $B=5.21$ Tl was equal to the control value of 2.17 ± 0.14 $\mu\text{M/g}$, and under the action of the PMF with induction of $B=2.21$ Tl, a decrease in the generation to 1.69 ± 0.14 $\mu\text{M/g}$ was noted, which is 1.3 times lower than the control value. In the second experiment with etiolated sprouts, after exposure in the dark, the following decreases in the generation of superoxide anion-radical were observed in relation to the control value equal to 1.53 ± 0.21 $\mu\text{M/g}$: when exposed to a PMF with induction of $B=0.53$ Tl, the generation was 1.21 ± 0.14 $\mu\text{M/g}$, which is 1.3 times less than the control; when exposed to a PMF with induction of 2.21 Tl, the generation was 1.12 ± 0.16 $\mu\text{M/g}$, which is 1.4 times less than the control; when exposed to a PMF with induction of $B=3.71$ Tl, the generation was 1.21 ± 0.24 $\mu\text{M/g}$, which is 1.3 times less than the control; when exposed to a PMF with induction of $B=5.21$ Tl, the generation was 1.13 ± 0.08 $\mu\text{M/g}$, which is 1.4 times less than the control. A third experiment was also conducted to establish the dependence of the value of generation of superoxide anion-radical by green sprouts on time after exposure to the pulsed magnetic field with induction of $B=2.21$ Tl under daylight of 800 lux. During the third experiment, the following result was obtained: before exposure to the PMF, generation of superoxide anion-radical was 1.69 ± 0.24 $\mu\text{M/g}$; 15 minutes after exposure, an increase in generation was noted to 1.77 ± 0.29 $\mu\text{M/g}$; after another 15 minutes the generation value remained high and equal to 1.77 ± 0.16 $\mu\text{M/g}$ but there was a tendency towards a decrease; after 60 minutes a decrease in generation to 1.61 ± 0.21 $\mu\text{M/g}$; and after 24 hours the generation value returned to the control value of 1.69 ± 0.14 $\mu\text{M/g}$. The result of the third experiment shows that the PMF with induction of $B=2.21$ Tl can act as a factor leading to development of oxidative stress in plants. But an hour after exposure, the developed oxidative stress is leveled out due by triggering of antioxidant mechanisms.

Conclusion. The data obtained in the course of three experiments allowed us to put forward the hypothesis that the PMF affects plants as a stress factor, provoking increased generation of superoxide anion-radical and also leads to the activation of the antioxidant system of defense of plants and its strengthening. To confirm the hypothesis put forward, it is proposed to conduct a number of additional experiments with the aim to establish the effect of a PMF on the generation of hydrogen peroxide and the activity of superoxide dismutase enzyme.

Key words: soft wheat; *Triticum aestivum* L.; green sprouts; etiolated sprouts; plants; superoxide anion-radical; high-intensity pulsed magnetic field; PMF; induction; inductor; experimental installation; generation; hypothesis

For citation. Blednyh, O. V., Rodenko, N. A., Glushchenkov, V. A., & Degteva, J. V. (2025). Generation of superoxide anion-radical in leaves of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) under the action of a high-intensity pulsed magnetic field. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 50–69. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1042>

Низкочастотное магнитное поле низкой напряжённости является проникающим агентом, оказывающее воздействие на системные механизмы, а также структурные и метаболические процессы на уровне клеток организма в целом [18]. Клеточных сенсоров, воспринимающих сигналы об изменении характеристик магнитного поля и преобразующих их в реакции клеток на организменном уровне, за редким исключением не выявлены [15].

В настоящее время широко обсуждается воздействие переменных, постоянных и импульсных магнитных полей (ИМП) индукции порядка $B=0,1$ Тл на биомембраны, в частности, на работу протонного насоса и липидный состав мембран [4; 12], а также их действие на свободнорадикальные процессы, проходящие в мембранах клеток и органелл, приводящих к развитию окислительного стресса через усиление генерации активных форм кислорода (АФК) [5; 11; 20; 21] и изменение активности некоторых ферментов: каталазы, супероксиддисмутазы (СОД), пероксидазы, глутатионредуктазы, глутатионтрансферазы [6; 10]. Также отмечалось, что активность клеток под действием магнитных полей изменяется вследствие резонансных явлений, происходящих в важных ионах таких как кальций, калий и другие [13; 22].

Исследования воздействия импульсных магнитных полей высокой напряжённости с временем воздействия порядка 2-5 мсек. при индукции $B > 0,1$ Тл на физическое и химическое состояние мембран и активность ферментов не проводились.

Цель настоящей работы является изучение влияния импульсных магнитных полей высокой напряжённости индукцией от 0,1 Тл на генерацию АФК в частности супероксид анион-радикала в листьях пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L. как ответной реакции на данное воздействие.

Материалы и методы

Исследования проводились лабораторией «Биоинженерии» СамНЦ РАН, во время которых изучалась ответная реакция растений на воздей-

ствие импульсного магнитного поля высокой напряжённости (индукции) в форме генерации супероксид анион-радикала.

Для эксперимента в лабораторных условиях были выращены девяти-суточные ростки пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L., из заранее пророщенных в чашках Петри по стандартной методике с модификацией семян (4500 шт.) [2].

Модификация заключалась в предварительной промывке семян дистиллированной водой, с последующим замачиванием на 30 минут в 2 % растворе KMnO_4 для дезинфекции, затем семена высушивались при комнатной температуре (20 °C) между листами фильтровальной бумаги в течении часа и переносились в заранее прогретые до температуры 30 °C в термостате (ТВ – 20ПЗ «К», Россия) чашки Петри на смоченный дистиллированной водой слой (фильтровальная бумага – стерильная вата – фильтровальная бумага) в количестве 1500 шт./чашка, слой семян накрывался увлажнённым отрезком стерильной марли. Проращивание семян проводилось в течении суток в термостате при температуре 24 °C с постоянной циркуляцией воздуха в нем.

Через сутки был произведен осмотр чашек Петри с отбором семян с раскрывшимися щитками и проростками корней длиной 1 мм в количестве 1000 шт. с каждой чашки. Отобранные семена переносились в пластиковые стаканы (250 мл) на слой «стерильная марля – вата – стерильная марля». Стаканы заполнялись дистиллированной водой до уровня семян, сверху накрытых тремя слоями влажной марли, закрывались стерильными крышками от чашек Петри

Стаканы с семенами помещались на трое суток в термостат при температуре 24 °C для дальнейшего проращивания с целью получения ростков, на четвертые сутки стаканы с ростками извлекались из термостата и размещались под лампами дневного света (первый эксперимент). Дальнейшее выращивание растений в течении оставшихся 5 суток велось при 8 часовом фотопериоде при освещении в 1600 лк и при комнатной температуре (20 °C). Стакан с ростками для проведения второго эксперимента оставался в термостате девять суток.

На девятые сутки был произведён отбор растений по следующим параметрам: длина стебля с листком от 75 до 85 мм, всего было отобрано 500 растений. Стебли с листьями отсекались ножницами от корней, взвешивались пучками по 10 шт. и помещались в стеклянные пробирки объемом 25 мл и размером 115×15 мм с 1 мл дистиллированной воды для проведения эксперимента по воздействию ИМП на зелёные и этиолированные ростки (рис. 1).

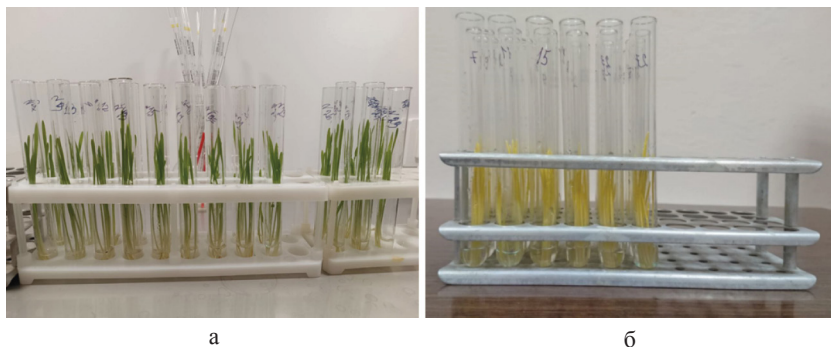


Рис. 1. Растения пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L. подготовленные для проведения эксперимента по воздействию ИМП.

Примечание: а – девятисуточные зеленые ростки; б – девятисуточные этиолированные ростки

Эксперимент по воздействию ИМП различной напряжённостью (индукцией) на растения проводили на экспериментальной установке МИУ-БИО-5 [19] с использованием специально сконструированного многovitкового индуктора для обработки биообъектов в пробирках (рис. 2).

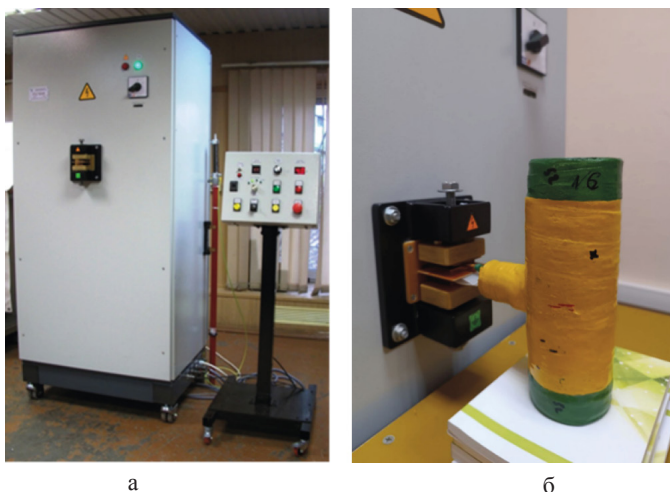


Рис. 2. Экспериментальная установка МИУ-БИО-5.

Примечание: а – внешний вид экспериментальной установки МИУ-БИО-5; б – многovitковый индуктор для обработки биообъектов.

Образцы растений в пробирках помещались в центральную часть многовиткового индуктора, закреплённого в клеммах экспериментальной установки в зону действия максимальной напряжённости магнитного поля (индукции) и временем импульса 2-5 мсек (рис. 3).

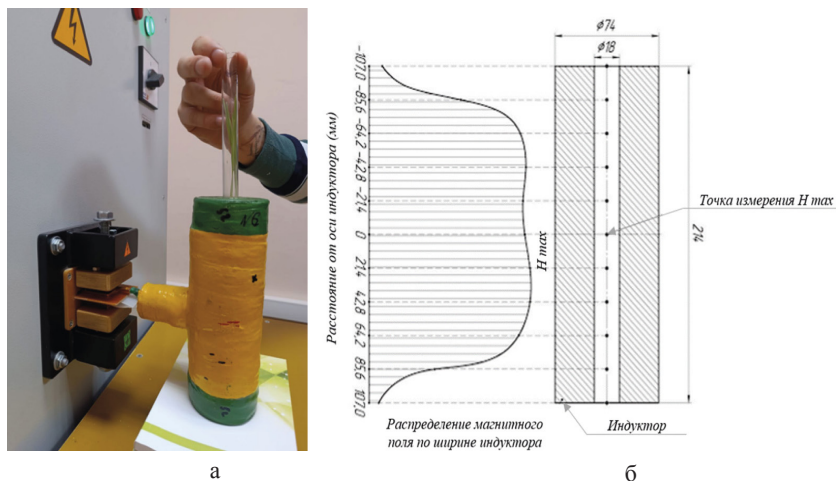


Рис. 3. Постановка эксперимента по воздействию ИМП на растения.

Примечание: а – размещение пробирки с ростками в индукторе; б – распределение магнитного поля в индукторе.

Эксперименты по генерации супероксид анион-радикала зелёными и этиолированными ростками после воздействия ИМП, а также от времени после воздействия проводились согласно следующим параметрам (табл. 1).

После воздействия ИМП:

1. Пробирки с обработанными зелёными ростками, а также с контрольными ростками помещались под лампами дневного света (1600 лк) на один час для активации фотосистемы I (первый эксперимент).
2. Пробирки с обработанными этиолированными ростками, а также с контрольными ростками помещались в темную комнату (термостат) на один час (второй эксперимент).
3. Обработанные зелёные ростки были подвергнуты биохимическому анализу сразу же после воздействия ИМП через определённые промежутки времени (15, 30, 60 мин), а также через 24 часа (третий эксперимент). Работа проводилась при рассеянном освещении (800 лк).

Таблица 1.

**Параметры воздействия ИМП высокой напряжённости (индукции)
на растения**

№ образца	Напряжённость ИМП (H), $\frac{A}{m^2}$	Индукция ИМП (B), Тл	Частота разрядного контура (f), кГц	Количество импульсов (n), шт	Время импульса (t), мсек	Время между импульсами – скважность (Δt), сек
Эксперимент по генерации супероксид анион-радикала зелёными ростками						
Контроль (1-10)	-	-	-	-	-	-
11 - 20	$0,42 \cdot 10^6$	0,53	15,7	3	2	2
21 - 30	$1,77 \cdot 10^6$	2,21				
31 - 40	$2,97 \cdot 10^6$	3,71				
41 - 50	$4,17 \cdot 10^6$	5,21				
Эксперимент по генерации супероксид анион-радикала этилированными ростками						
Контроль (1 -10)	-	-	-	-	-	-
11 - 20	$0,42 \cdot 10^6$	0,53	15,7	3	2	2
21 - 30	$1,77 \cdot 10^6$	2,21				
31 - 40	$2,97 \cdot 10^6$	3,71				
40 - 50	$4,17 \cdot 10^6$	5,21				
Эксперимент по генерации супероксид анион-радикала зелеными ростками в зависимости от времени после воздействия ИМП						
Контроль (1 - 10)	-	-	-	-	-	-
15 минут после воздействия (11 - 20)	$1,77 \cdot 10^6$	2,21	15,7	3	2	2
30 минут после воздействия (21 - 30)						
60 минут после воздействия (31 - 40)						
24 часа после воздействия (41 - 50)						

Для регистрации генерации супероксид анион-радикала применялся акцепторный метод, с последующим проведением фотометрического измерения при 480 нм [7; 9]. Суть данного метода заключается в способности адреналина в слабощелочной среде или в присутствии сильных окислителей окисляться до адренохрома, то есть быть донором электронов [16; 17].

Биохимический анализ выполнялся в соответствии с алгоритмом: 1) отрезки листьев (10 шт./вариант) переносились в стаканы и один час ин-

кубировались в 0,025 мМ (ммоль) растворе CaCl_2 (10 мл) при постоянном покачивании (120 об/мин) и температуре (30 °С) в орбитальном шейкер-инкубаторе (Biosan ES-20/60, Латвия); 2) через час в экстракт вносили 1 мл 10^{-3} М (моль) адреналина (ФГУП «Московский эндокринный завод», Россия) и продолжали инкубацию при тех же значениях покачивания и температуры в течении 15 мин; 3) после 15 минутной инкубации с адреналином реакцию его окисления останавливали внесением 125 мкл 0,05 н раствора HCl ; 4) полученные экстракты фильтровались через фильтровальную бумагу (синяя лента); 5) измерялась оптическая плотность экстрактов при 480 нм на спектрофотометре (Альтаир КФК-300УФ, Россия) с использованием стеклянной кюветы с длиной оптического пути равного 10 мм; 6) за ноль измерения бралась холостая проба состава: 10 мл 0,025 мМ CaCl_2 + 125 мкл 0,05 н HCl ; 7) расчет концентрации супероксид анион-радикала производили по формуле:

$$C = \frac{D \cdot V \cdot k}{m \cdot \varepsilon}, \quad (1)$$

где:

C – содержание супероксид анион-радикала, мкмоль (μМ);

D – оптическая плотность при A_{480} ;

V – объем экстракта в кювете, мл;

k – коэффициент цветности экстракта (0,1-0,5);

m – масса сырой навески, г;

ε – коэффициент молярной экстинкции адренохрома $4020 \text{ M}^{-1}/\text{cm}^{-1}$.

Математическая и статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью программ MS Excel 2016 и jamovi.

Результаты и обсуждение

При измерении оптической плотности экстрактов в эксперименте с зелеными ростками были получены следующие значения уровня супероксид анион-радикала, что соответствует его генерации после воздействия ИМП (рис. 4).

Анализируя экспериментальные данные представленные на рисунке 4, видно, что через 60 минут после воздействия ИМП на зелёные ростки при условии освещения в 1600 лк (активация фотосистемы I) фотоиндуцированная генерация супероксид анион-радикала существенно не различалась от контроля равного $2,17 \pm 0,14 \text{ μM/г}$ при значениях индукции магнитного поля $B=0,53 \text{ Тл}$ ($2,09 \pm 0,08 \text{ μM/г}$), $B=3,71 \text{ Тл}$ ($2,17 \pm 0,14 \text{ μM/г}$) и $B=5,21 \text{ Тл}$ ($2,01 \pm 0,08 \text{ μM/г}$). При воздействии ИМП индукцией $B=2,21 \text{ Тл}$ наблюдалось снижение уровня супероксид анион-радикала до $1,69 \pm 0,14 \text{ μM/г}$, что ниже контроля в 1,3 раза.

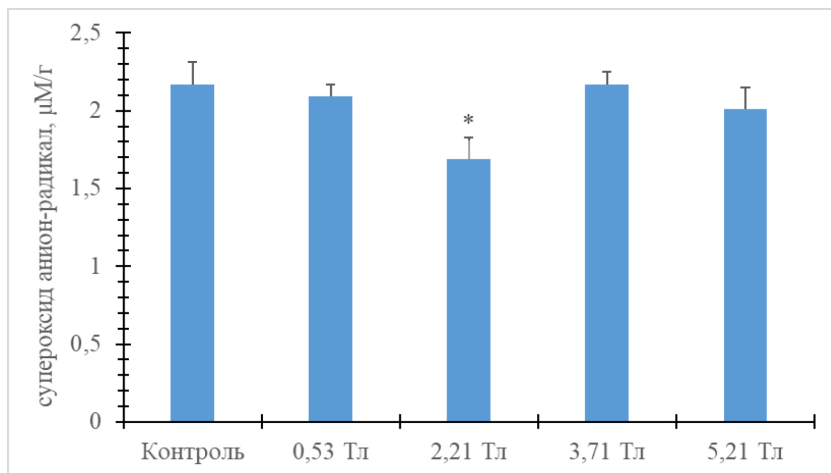


Рис. 4. Уровень супероксид анион-радикала в зелёных ростках *Triticum aestivum* L. после обработки ИМП.

Примечание: * – отличие уровня супероксид анион-радикала от контроля достоверны с уровнем значимости $p < 0,05$.

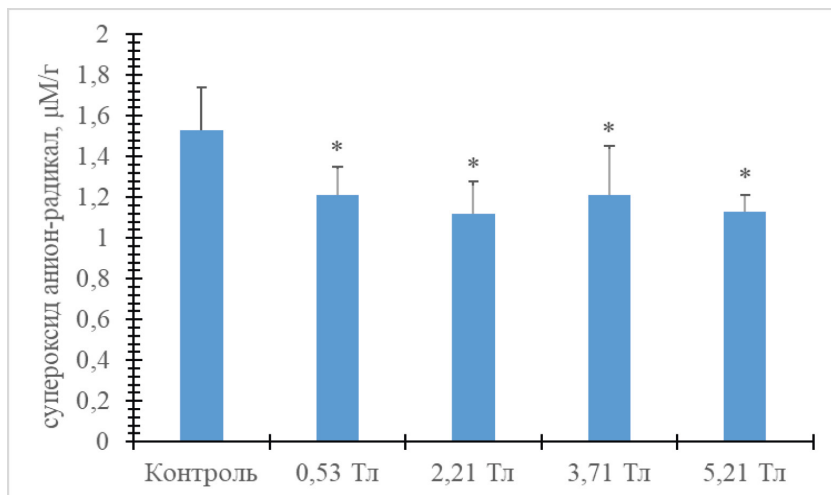


Рис. 5. Уровень супероксид анион-радикала в этилированных ростках *Triticum aestivum* L. после обработки ИМП.

Примечание: * – отличие уровня супероксид анион-радикала от контроля достоверны с уровнем значимости $p < 0,05$.

При измерении оптической плотности экстрактов в эксперименте с этиолированными ростками были получены следующие значения уровня супероксид анион-радикала, что соответствует его генерации после воздействия ИМП (рис. 5).

Анализируя экспериментальные данные представленные на рисунке 5 видно, что через 60 минут после воздействия ИМП на этиолированные ростки наблюдалось существенное снижение генерации супероксид анион-радикала по сравнению с контролем ($1,53 \pm 0,21 \text{ } \mu\text{M/r}$) в 1,3 раза при индукции $B=0,53 \text{ Тл}$ ($1,21 \pm 0,14 \text{ } \mu\text{M/r}$) и $B=3,71 \text{ Тл}$ ($1,21 \pm 0,24 \text{ } \mu\text{M/r}$) и в 1,4 раза при индукции $B=2,21 \text{ Тл}$ ($1,12 \pm 0,16 \text{ } \mu\text{M/r}$) и $B=5,21 \text{ Тл}$ ($1,13 \pm 0,08 \text{ } \mu\text{M/r}$).

Так же кроме экспериментов с зелёными и этиолированными ростками, был проведен еще один эксперимент с целью установить влияние ИМП на генерацию супероксид анион-радикала в зависимости от времени после воздействия.

В качестве целевого параметра воздействия была выбрана индукция ИМП $B=2,21 \text{ Тл}$, так как в первом эксперименте наблюдалось существенное снижение уровня супероксид анион-радикала.

При измерении оптической плотности экстрактов в ходе третьего эксперимента были получены следующие значения уровня супероксид анион-радикала, что соответствует его генерации после воздействия ИМП (рис. 6).

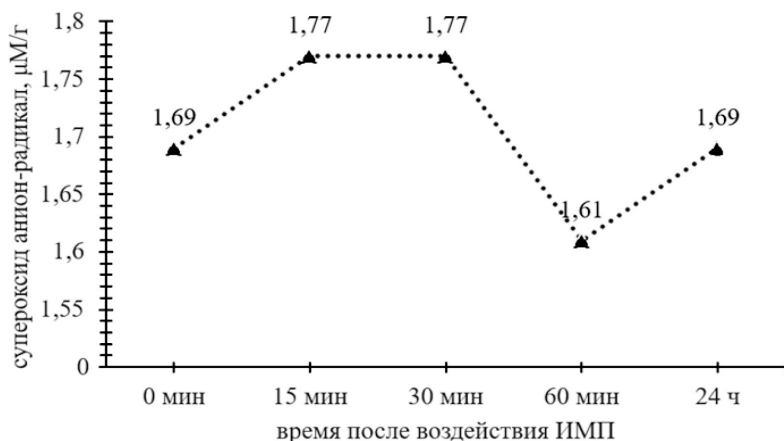


Рис. 6. Уровень супероксид анион-радикала в зелёных ростках *Triticum aestivum* L. в зависимости от времени после воздействия ИМП индукцией 2,21 Тл.

Анализируя экспериментальные данные представленные на рисунке 6 видно, что сразу после воздействия ИМП индукцией $B=2,21 \text{ Тл}$ повы-

шение уровня супероксид анион-радикала не наблюдалось и составляло $1,69 \pm 0,24 \text{ } \mu\text{M/г}$ (контроль). Через 15 минут после воздействия отмечено повышение уровня до $1,77 \pm 0,29 \text{ } \mu\text{M/г}$, что выше контроля в 1,1 раз, через 30 минут уровень супероксид анион-радикала был равен 15 минутному отрезку. Через 60 минут отмечено снижение уровня супероксид анион-радикала до $1,61 \pm 0,21 \text{ } \mu\text{M/г}$, что ниже контроля в 1,1 раз и ниже значений 15 и 30 минутных отрезков в 1,2 раза. Через 24 часа уровень супероксид анион-радикала вернулся к контрольному значению равному $1,69 \pm 0,14 \text{ } \mu\text{M/г}$.

Полученные результаты экспериментов сопоставимы с результатами экспериментов, отражённых в других работах, посвящённых действию постоянных и переменных магнитных полей, ультрафиолетового и ионизирующего излучения, высокой и низкой температуры как факторов физической природы, вызывающих окислительный стресс у растений [1, 3, 10].

На основании полученных результатов была выдвинута гипотеза о том, что ИМП высокой напряжённости через воздействие на электротранспортные цепи хлоропластов (эксперимент с зелёными ростками) и митохондрий (эксперимент с этиолированными ростками) как мишени, может выступать как физический фактор развития окислительного стресса у растений, а также через повышение активности супероксиддисмутазы (СОД) или через усиление спонтанного превращения супероксид анион-радикала в пероксид водорода будет снижать его уровень (рис. 7).

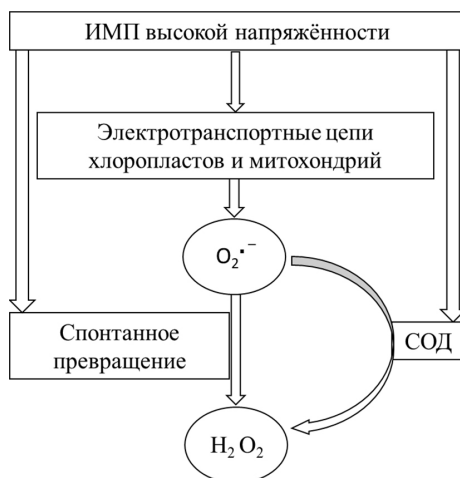


Рис. 7. Предполагаемый механизм воздействия ИМП высокой напряжённости на процесс генерации активных форм кислорода, у усиления активности СОД.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы, необходимо расширить исследования и провести эксперименты, показывающие повышение уровня пероксида водорода и увеличения активности СОД.

Резюмируя данные трех экспериментов видно, что воздействие ИМП высокой напряжённости может выступать как физический фактор развития кратковременного окислительного стресса у растений, а также может приводить к стимуляции механизмов антиоксидантной защиты при определённых значениях индукции магнитного поля [14].

Заключение

Видно, что при индукциях $B=0,53$ Тл, $B=3,71$ Тл и $B=5,21$ Тл уровень супероксид анион-радикала остается равным контролю в эксперименте с зелёными ростками и снижается в эксперименте с этиолированными ростками.

Хотелось бы отметить, что при действии ИМП индукцией $B=2,21$ Тл эффект снижения уровня супероксид анион-радикала в экспериментах как с зелёными, так и этиолированными ростками, что может говорить о более высоком биологическом эффекте.

Так же видно, что эффект повышения уровня супероксид анион-радикала после воздействия ИМП кратковременен и имеет продолжительность не более 30 минут.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарны исполняющему обязанности директору ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады» Сергееву Максиму Сергеевичу за помощь и всестороннюю поддержку, а также заведующей лаборатории биохимии, биотехнологий и биоинженерии Самарского университета к.б.н., доценту Писаревой Елене Владимировне и к.б.н., доценту кафедры экологии, ботаники и охраны природы Самарского университета Корчикову Евгению Сергеевичу за консультационную помощь в планировании экспериментов.

Список литературы

1. Васильева, Е. А., Синицына, Ю. В., Половинкина, Е. О., Цыганкова, М. И., & Веселов, А. П. (2010). Изменение некоторых параметров перекисного гомеостаза хлоропластов гороха в ответ на действие физических факторов низкой интенсивности. *Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского*, 2(2), 498-503.

2. ГОСТ 12038-84. (2011). Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва: Издательство стандартов.
3. Махдавиан, К., Горбанли, М., & Калантари, Х. М. (2008). Влияние салициловой кислоты на формирование окислительного стресса, индуцированного УФ-светом в листьях перца. *Физиология растений*, 55(4), 620-623.
4. Новицкая, Г. В., Церенова, О. А., Кочешкова, Т. К., & Новицкий, Ю. И. (2006). Влияние переменного магнитного поля на состав и содержание липидов в проростках редиса. *Физиология растений*, 53(1), 83-93.
5. Пономарев, В. О., & Новиков, В. В. (2009). Влияние низкочастотных переменных магнитных полей на скорость биохимических реакций, протекающих с образованием активных форм кислорода. *Биофизика*, 54(2), 235-241.
6. Половинкина, Е. О., Касьянова, Е. А., Синецына, Ю. В., & Веселов, А. П. (2011). Изменение уровня перекисного окисления липидов и активности компонентов антиоксидантного комплекса в хлоропластах гороха при воздействии слабых импульсных магнитных полей. *Физиология растений*, 58(6), 930-934.
7. Плотникова, Л. Я., Пожерукова, В. Е., Митрофанова, О. П., & Дегтярев, А. И. (2016). Влияние индукции или подавления окислительного взрыва на взаимодействие возбудителя бурой ржавчины с пшеницей Тимофеева. *Прикладная биохимия и микробиология*, 52(1), 74-84. <https://doi.org/10.7868/S0555109916010098>
8. Сердюков, Ю. А., & Новицкий, Ю. И. (2013). Действие слабого постоянного магнитного поля на активность антиоксидантных ферментов у проростков редиса. *Физиология растений*, 60(1), 66-74. <https://doi.org/10.7868/S0015330313010065>
9. Сахабутдинова, А. Р., Фатхудинова, Д. Р., & Шакирова, Ф. М. (2004). Влияние салициловой кислоты на активность антиоксидантных ферментов у пшеницы в условиях засоления. *Прикладная биохимия и микробиология*, 40(5), 579-583.
10. Сафонова, В.С. (2017). Влияние различных факторов на содержание активных форм кислорода в растениях семейства Яснотковые (на примере базилика различных сортов). *Международный школьный научный вестник*, 1, 37-44.
11. Текуцкая, Е.Е., Барышев, М.Г. (2020). Окислительные повреждения ДНК, ионизирующие излучения и магнитные поля. *Актуальная биотехнология*, 3, 518-521.
12. Шибарова, А.Н., Орлова, О.В., Лобкаева, Е.П. (2004). Влияние импульсного магнитного поля на некоторые биофизические показатели семян тыквы

- (*Cucurbita pepo* L.). Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. Серия Биология, 1(7), 111-116.
13. Яблокова, Е.В., Кувичкин, В.В., Новиков, В.В. (2013). Действие слабых комбинированных постоянного и низкочастотного переменного магнитных полей на активность пероксидазы в растворах хлорида кальция. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, 12(3), 1-3.
 14. Abe, K., Fujii, N., Motokawa, M., & Takahashi, H. (1997). Effect of a high magnetic field on plants. *Biological Sciences in Space*, 11, 240-247.
 15. Massimo, E. M. (2014). Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
 16. Mininbayeva, F. V., Gordon, L. K., Kolesnikov, O. P., & Chasov, A. V. (2001). Role of extracellular peroxidase in the superoxide production by wheat root cells. *Protoplasma*, 217, 125-128. <https://doi.org/10.1007/BF01289421>
 17. Misra, H. P., & Fridovich, I. (1972). The univalent reduction of oxygen by reduced flavins and quinones. *The Journal of Biological Chemistry*, 247(1), 188-192. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)45773-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)45773-6)
 18. Panagopoulos, D. J., Karabarbounis, A., & Margatiris, L. H. (2002). Mechanism for action of electromagnetic fields on cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 298, 95-102. [https://doi.org/10.1016/S0006-291X\(02\)02393-8](https://doi.org/10.1016/S0006-291X(02)02393-8)
 19. RU Patent No. 213806 U1. (2011, June 21).
 20. Shine, M. B., Gurupsasad, K. N., & Anjali, A. (2011). Superoxide radical production and performance index of photosystem II in leaves from magnetoprimed soybean seeds. *Plant Signaling & Behavior*, 6(11), 1635-1637. <https://doi.org/10.4161/psb.6.11.17720>
 21. Shine, M. B., Guruprasad, K. N., & Anand, A. (2012). Effect of stationary magnetic field strengths of 150 and 200 mT on reactive oxygen species production in soybean. *Bioelectromagnetics*, 33(5), 428-437. <https://doi.org/10.1002/bem.21702>
 22. Walleczek, J., & Budinger, T. F. (1992). Pulsed magnetic field effects on calcium signaling in lymphocytes: Dependence on cell status and field intensity. *FEBS Letters*, 314(3), 351-355. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(92\)81504-F](https://doi.org/10.1016/0014-5793(92)81504-F)

References

1. Vasilyeva, E. A., Sinitsyna, Y. V., Polovinkina, E. O., Tsygankova, M. I., & Veselov, A. P. (2010). Changes in some parameters of chloroplast peroxide homeostasis in peas under low-intensity physical factors. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo*, 2(2), 498-503.

2. GOST 12038-84. (2011). Interstate standard. Methods for determining germination of agricultural crop seeds. Moscow: Standards Publishing House.
3. Mahdaviān, K., Gorbanli, M., & Kalantari, H. M. (2008). Effects of salicylic acid on oxidative stress induced by UV light in pepper leaves. *Fiziologiya rastenii*, 55(4), 620-623.
4. Novitskaya, G. V., Tserenova, O. A., Kocheshkova, T. K., & Novitskiy, Y. I. (2006). Influence of alternating magnetic field on lipid composition and content in radish seedlings. *Fiziologiya rastenii*, 53(1), 83-93.
5. Ponomarev, V. O., & Novikov, V. V. (2009). Low-frequency variable magnetic fields affect biochemical reactions involving active forms of oxygen. *Biophysics*, 54(2), 235-241.
6. Polovinkina, E. O., Kas'yanova, E. A., Sinitsyna, Y. V., & Veselov, A. P. (2011). Alterations in lipid peroxidation level and antioxidant complex activity in pea chloroplasts exposed to weak pulsed magnetic fields. *Fiziologiya rastenii*, 58(6), 930-934.
7. Plotnikova, L. Ya., Pozherukova, V. E., Mitrofanova, O. P., & Degtyarev, A. I. (2016). Induction or suppression of oxidative burst affects interaction between brown rust pathogen and Timofeev's wheat. *Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiya*, 52(1), 74-84. <https://doi.org/10.7868/S0555109916010098>
8. Serdyukov, Yu. A., & Novitskiy, Yu. I. (2013). Weak constant magnetic field influences antioxidant enzyme activity in radish sprouts. *Fiziologiya rastenii*, 60(1), 66-74. <https://doi.org/10.7868/S0015330313010065>
9. Sakhabutdinova, A. R., Fatkhudinova, D. R., & Shakirova, F. M. (2004). Salicylic acid influence on antioxidant enzymes activity in wheat under salt conditions. *Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiya*, 40(5), 579-583.
10. Safonova, V. S. (2017). Impact of various factors on active oxygen forms content in plants of Lamiaceae family (using different basil varieties as an example). *Mezhdunarodnyi shkol'nyi nauchnyi vestnik*, 1, 37-44.
11. Tekutskaya, E. E., & Baryshev, M. G. (2020). Oxidative DNA damage, ionizing radiation, and magnetic fields. *Aktual'naya biotekhnologiya*, 3, 518-521.
12. Shibarova, A. N., Orlova, O. V., & Lobkaeva, E. P. (2004). Impulse magnetic field effect on certain biophysical indicators of pumpkin seeds (*Cucurbita pepo* L.). *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo. Seriya Biologia*, 1(7), 111-116.
13. Yablochkova, E. V., Kuvechkin, V. V., & Novikov, V. V. (2013). Action of combined weak static and low-frequency alternating magnetic fields on peroxidase activity in solutions of calcium chloride. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 12(3), 1-3.

14. Abe, K., Fujii, N., Motokawa, M., & Takahashi, H. (1997). Effect of a high magnetic field on plants. *Biological Sciences in Space*, 11, 240-247.
15. Massimo, E. M. (2014). Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
16. Mininbayeva, F. V., Gordon, L. K., Kolesnikov, O. P., & Chasov, A. V. (2001). Role of extracellular peroxidase in the superoxide production by wheat root cells. *Protoplasma*, 217, 125-128. <https://doi.org/10.1007/BF01289421>
17. Misra, H. P., & Fridovich, I. (1972). The univalent reduction of oxygen by reduced flavins and quinones. *The Journal of Biological Chemistry*, 247(1), 188-192. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)45773-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)45773-6)
18. Panagopoulos, D. J., Karabarbounis, A., & Margatiris, L. H. (2002). Mechanism for action of electromagnetic fields on cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 298, 95-102. [https://doi.org/10.1016/S0006-291X\(02\)02393-8](https://doi.org/10.1016/S0006-291X(02)02393-8)
19. RU Patent No. 213806 U1. (2011, June 21).
20. Shine, M. B., Gurupsasad, K. N., & Anjali, A. (2011). Superoxide radical production and performance index of photosystem II in leaves from magnetoprimed soybean seeds. *Plant Signaling & Behavior*, 6(11), 1635-1637. <https://doi.org/10.4161/psb.6.11.17720>
21. Shine, M. B., Guruprasad, K. N., & Anand, A. (2012). Effect of stationary magnetic field strengths of 150 and 200 mT on reactive oxygen species production in soybean. *Bioelectromagnetics*, 33(5), 428-437. <https://doi.org/10.1002/bem.21702>
22. Walleczek, J., & Budinger, T. F. (1992). Pulsed magnetic field effects on calcium signaling in lymphocytes: Dependence on cell status and field intensity. *FEBS Letters*, 314(3), 351-355. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(92\)81504-F](https://doi.org/10.1016/0014-5793(92)81504-F)

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бледных Олег Владимирович, научный сотрудник лаборатории «Биоинженерия»

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Студенческий переулок, 3А, г. Самара, 443001, Российская Федерация
helgv@blednykh.ru

Роденко Наталья Алексеевна, аспирант, научный сотрудник лаборатории «Биоинженерия»

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

*Студенческий переулок, 3А, г. Самара, 443001, Российская Федерация
t.rodenko@mail.ru*

Глушенков Владимир Александрович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории «Биоинженерия»
*Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
Студенческий переулок, 3А, г. Самара, 443001, Российская Федерация
vgl@ssau.ru*

Дегтева Юлия Вячеславовна, студент, лаборант лаборатории «Биоинженерия»
*Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
Студенческий переулок, 3А, г. Самара, 443001, Российская Федерация
deswelta@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Oleg V. Blednykh, Researcher of the Bioengineering Laboratory
*Samara Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
3A, Studenchesky pereulok, Samara, 443001, Russian Federation
helgv@blednykh.ru
SPIN-code: 7698-8840
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9365-6783>*

Natalia A. Rodenko, Postgraduate Student, Researcher of the Bioengineering Laboratory
*Samara Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
3A, Studenchesky pereulok, Samara, 443001, Russian Federation
t.rodenko@mail.ru
SPIN-code: 2531-1408
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0623-7207>
ResearcherID: GRF-4177-2022
Scopus Author ID: 57209502549*

Vladimir A. Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Bioengineering Laboratory

*Samara Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
3A, Studenchesky pereulok, Samara, 443001, Russian Federation
vgl@ssau.ru
SPIN-code: 5304-6865
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8368-2905>
ResearcherID: AAO-1356-2020
Scopus Author ID: 55060425900*

Yulia V. Degteva, Student, Laboratory Assistant of the Bioengineering Laboratory

*Samara Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
3A, Studenchesky pereulok, Samara, 443001, Russian Federation
deswelta@gmail.com
SPIN-code: 2531-1408
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0623-7207>
ResearcherID: GRF-4177-2022
Scopus Author ID: 57209502549*

Поступила 05.07.2024

После рецензирования 20.07.2024

Принята 10.08.2024

Received 05.07.2024

Revised 20.07.2024

Accepted 10.08.2024