

## КОМБИНИРОВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

УДК 537.8:546.81:57.042:631.427

# ВЛИЯНИЕ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ СВИНЦОМ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ ЮГА РОССИИ

© 2020 г. Т. В. Денисова<sup>а,\*</sup>, М. С. Мазанко<sup>а</sup>, С. И. Колесников<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

\*E-mail: denisova777@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.06.2019 г.

После доработки 04.04.2020 г.

Принята к публикации 28.08.2020 г.

В модельных экспериментах изучено влияние сочетанного воздействия загрязнения свинцом в концентрациях 100, 500, 1000, 1500, 2000 мг/кг и переменного магнитного поля промышленной частоты (50 Гц) индукцией 300, 1500 и 3000 мкТл на ферментативную активность, почвенную микробную биомассу и фитотоксичность чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков. В зависимости от концентрации свинца и уровня индукции переменного магнитного поля факторы оказали как синергическое, так и антагонистическое действие. Наиболее чувствительными к сочетанному загрязнению оказались серопески. Основной вклад в изменение биологических свойств вносило загрязнение свинцом, меньшим был вклад переменного магнитного поля и сочетанного действия факторов.

**Ключевые слова:** переменное магнитное поле, загрязнение свинцом, почвенная микрофлора, почвенные ферменты, чернозем обыкновенный, бурая лесная почва, серопески

**DOI:** 10.31857/S0869803120060168

Загрязнение почв в настоящее время – одна из наиболее острых экологических проблем. Это, в частности, связано с той огромной ролью, которую выполняет почва в биосфере, сельском хозяйстве и экономике страны в целом [1].

Тяжелые металлы, накапливающиеся в почве, способны приводить к изменению как биологических, так и физических свойств почвы. К тому же, связываясь с почвенными компонентами, они способны надолго оставаться в почве [2–7].

Электромагнитные поля (ЭМП) оказывают воздействие на все уровни организации жизни, их действие связано с работой многих механизмов, в основе которых лежит процесс поглощения и преобразования энергии излучения. В связи с тем, что количество источников электромагнитных полей постоянно возрастает, актуальность электромагнитного загрязнения среды становится все более острой [8–12].

Накоплено большое количество работ, посвященных исследованию влияния химического загрязнения и электромагнитных полей на почву и ее свойства. Работ, касающихся сочетанного влияния химического загрязнения и электромагнитных полей, гораздо меньше.

Целью настоящей работы было исследование влияния сочетанного загрязнения свинцом и переменным магнитным полем на биологические свойства разных типов почв Юга России.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В качестве объектов исследования были использованы чернозем обыкновенный карбонатный, бурая лесная почва и серопески (табл. 1). Это почвы занимают значительную территорию Юга России и хорошо изучены [13, 14]. Почвы существенно различаются между собой по содержанию гумуса, реакции среды (рН), содержанию карбонатов, гранулометрическому составу, поглонительной способности, биологической активности и другим свойствам, определяющим устойчивость почвы к антропогенным воздействиям.

*Загрязнение свинцом.* Свежевысушенные образцы почвы (200 г) помещали в стеклянные сосуды, загрязняли свинцом в форме оксида (PbO) в концентрации 100, 500, 1000, 1500, 2000 мг свинца на кг почвы. Это количество соответствует 1, 5, 10, 15, 20 ПДК свинца, принятых в Германии. Были использованы ПДК, разработанные в Германии, – 100 мг/кг почвы, поскольку российская

**Таблица 1.** Характеристика мест отбора и исследованных почв  
**Table 1.** Characteristics of sampling sites and investigated soils

Тип почвы	Место отбора	Гранулометрический состав	pH	Содержание гумуса, %
Чернозем обыкновенный	Ростов-на-Дону, ботанический сад	тяжелосуглинистый	7.8	4.2
Буряя лесная почва	Республика Адыгея, п. Никель	тяжелосуглинистый	5.3	2.2
Серопески	Ростовская область, Каменский район	песчаный	7.4	1.3

ПДК валового содержания свинца в почве составляет 32 мг/кг почвы, что очень часто меньше его среднего содержания в черноземах Юга России.

В качестве загрязняющего вещества использовали оксид свинца (II), так как основное количество свинца попадает в почву в форме оксида. Поскольку оксид свинца нерастворим в воде, для равномерного загрязнения всего объема почвы в вегетационном сосуде его сначала растирали с небольшим объемом почвы, а затем смешивали с остальной почвой. Затем почву увлажняли водой до 60% от полной влагоемкости.

*Воздействие переменного магнитного поля (ПеМП).* Свежевысушенные образцы почвы (200 г) помещали в стеклянные сосуды, увлажняли водой (до 60% от полной влагоемкости) и помещали в установку (соленоид). Описание установки представлено в наших предыдущих работах [15, 16]. При нахождении образцов почв в соленоиде основным энергетическим фактором является магнитное поле. Уровни индукции ПеМП составили 300, 1500 и 3000 мкТл промышленной частоты 50 Гц.

*Сочетанное загрязнение.* Образцы почвы, загрязненные свинцом, помещали в соленоид.

Контролем служили образцы почвы, находившиеся в тех же условиях, но не подвергавшиеся загрязнению свинцом, воздействию переменного магнитного поля и сочетанного загрязнения. Длительность эксперимента составила 10 сут. Был использован метод “слепого” опыта.

После окончания срока инкубации во влажных образцах определяли: численность аммонифицирующих бактерий на МПА, почвенную микробную биомассу регидратационным методом, фитотоксичность почвы с использованием в качестве тест-объекта редиса (*Raphanus sativus*), сорт “Дуро краснодарское”. В воздушно-сухих образцах определяли активность почвенных ферментов – каталазы и дегидрогеназы.

Лабораторно-аналитические исследования выполняли по общепринятым методикам [17, 18]. Опыты ставили в трехкратной повторности. Зна-

чение показателей в контрольных образцах принимали за 100%. Аналитические определения биохимических и микробиологических показателей выполняли в 4–12-кратной повторности. Статистическая обработка данных, дисперсионный (с учетом множественности сравнений по Тьюки) и корреляционный анализы, были выполнены с использованием статистического пакета Statistica 10.0 для Windows.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по активности ферментов, длине корневой тест-объекта и количеству почвенной микробной биомассы в контрольной почве представлены в табл. 2 и были приняты за 100%.

*Ферментативная активность.* Загрязнение свинцом в концентрации 1000, 1500 и 2000 мкг/кг оказало достоверное подавляющее воздействие на активность каталазы чернозема обыкновенного на 37–40% ( $p = 0.00015$ ) и на активность каталазы серопесков на 21–42% ( $p = 0.00015$ ;  $p = 0.00028$ ) (рис. 1), что согласуется с предыдущими исследованиями [3, 19].

Меньшие концентрации свинца (100 и 500 мг/кг) не оказали достоверного воздействия на активность каталазы чернозема обыкновенного, оказали стимулирующее воздействие на активность фермента бурой лесной почвы на 18–24% ( $p = 0.000127$ ).

ПеМП как самостоятельный фактор не оказало достоверного влияния на активность каталазы исследованных почв.

При сочетанном воздействии ПеМП и загрязнение свинцом в концентрации 1000, 1500 и 2000 мг/кг оказали почти во всех вариантах подавляющее воздействие на 20–50% ( $p = 0.00015$ ) на активность каталазы чернозема и серопесков.

При сочетанном загрязнении чернозема ПеМП оказывало антагонистический эффект с химическим загрязнением. Тот же эффект, но в меньшей степени, был зафиксирован и для бурой лесной почвы. Для серопесков антагонистиче-

**Таблица 2.** Значения показателей в незагрязненной почве  
**Table 2.** Values of uncontaminated soil's indicators

Показатель	Чернозем			Бурая лесная почва			Серопески		
	Среднее $\pm$ ошибка среднего, $M \pm m$	Стандартное отклонение, s	Коэффициент вариации, CV, %	Среднее $\pm$ ошибка среднего, $M \pm m$	Стандартное отклонение, s	Коэффициент вариации, CV, %	Среднее $\pm$ ошибка среднего, $M \pm m$	Стандартное отклонение, s	Коэффициент вариации, CV, %
Активность каталазы, мл $O_2$ /г	10.9 $\pm$ 0.13	0.26	2.4	6.6 $\pm$ 0.10	0.19	2.9	1.8 $\pm$ 0.05	0.19	20.5
Активность дегидрогеназы, мг ТТХ/10 г	29.89 $\pm$ 0.32	0.64	24.97	37.41 $\pm$ 1.70	3.39	9.1	18.09 $\pm$ 0.22	0.87	18.29
Длина побегов и корней, мм	52.7 $\pm$ 1.21	7.8	31.4	51.2 $\pm$ 6.67	15.69	32.6	11.4 $\pm$ 0.13	3.31	29.1
Почвенная микробная биомасса, мкг/г почвы	347 $\pm$ 25	79.11	22.8	378 $\pm$ 32	93.3	24.7	—	—	—

**Таблица 3.** Вклад каждого фактора в изменение биологических свойств чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков при самостоятельном и сочетанном воздействии свинца и переменного магнитного поля  
**Table 3.** Each factor's contribution to changes in the biological properties of ordinary chernozem, brown forest soil and seropeskis with independent and combined effects of lead and an alternating magnetic field

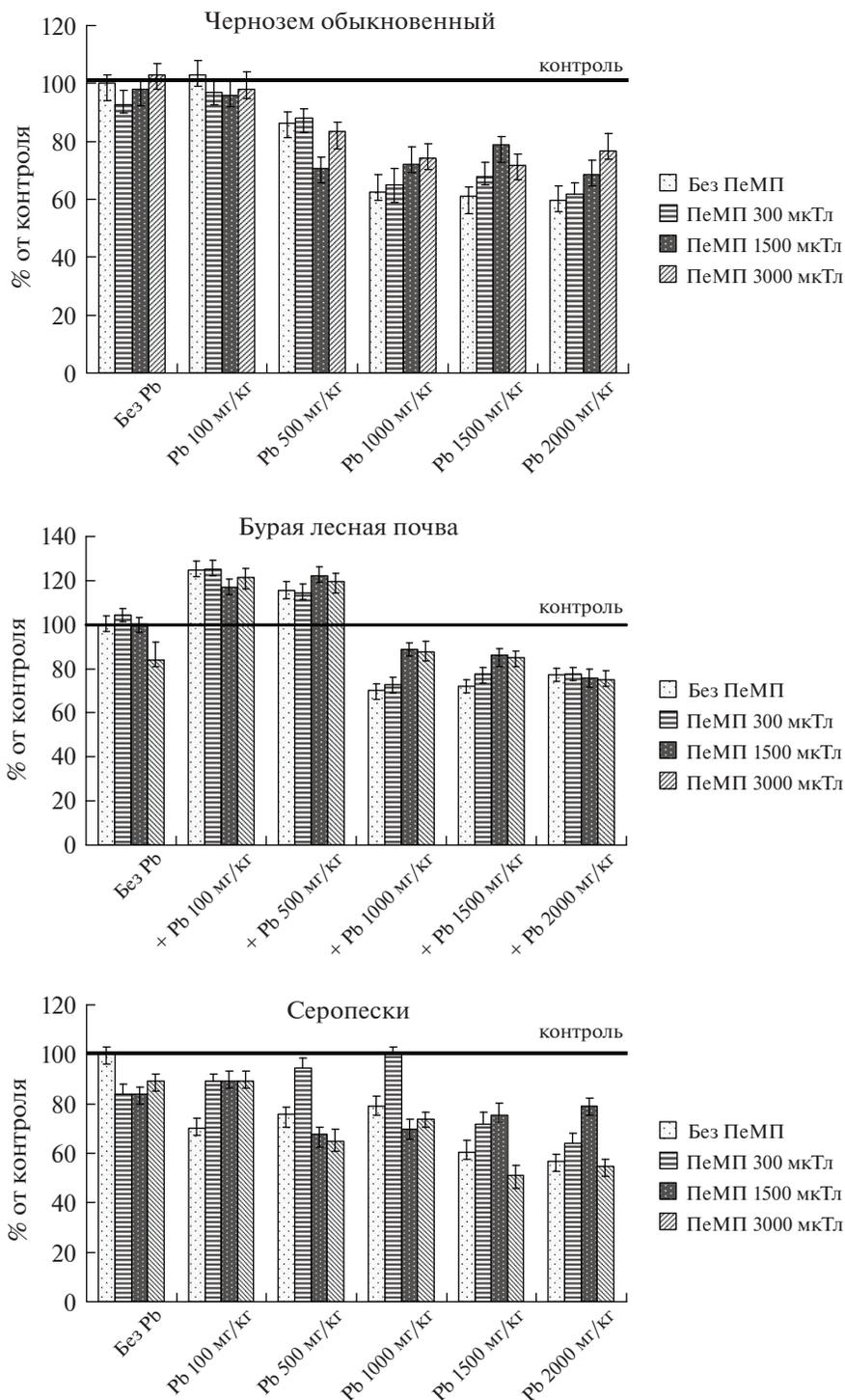
Показатель	Чернозем обыкновенный				Бурая лесная почва				Серопески			
	ПеМП	Свинец	Взаимодействие факторов	Ошибка	ПеМП	Свинец	Взаимодействие факторов	Ошибка	ПеМП	Свинец	Взаимодействие факторов	Ошибка
Активность каталазы	5%	68%*	22%*	5%	12%	62%*	17%*	9%	7%	59%*	27%*	7%
Активность дегидрогеназы	7%	71%*	15%*	7%	14%*	70%*	5%	11%	9%	61%*	22%*	8%
Длина корней	14%	68%*	6%	12%	10%	77%*	6%	7%	11%	66%*	8%	15%
Почвенная микробная биомасса	17%*	43%*	27%*	13%	19%*	50%*	25%*	6%	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.

\*  $p < 0.05$ .

ское действие ПеМП было установлено только для уровня индукции 300 мкТл.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что вклад взаимодействия свинцового и электромагнитного загрязнения составил для чернозема 22%, для серопесков – 27%, для бурой лесной почвы – 17% ( $p < 0.05$ ) (табл. 3). Вклад загрязнения свинцом – 68, 59 и 62% соответственно. Достоверного вклада ПеМП установлено не было.

На активность дегидрогеназы исследованных почв, так же, как и в случае с активностью каталазы, загрязнение свинцом как самостоятельный фактор в концентрации 1000, 1500 и 2000 мкг/кг оказало достоверное подавляющее воздействие на 12–38% ( $p = 0.00015$ ) (рис. 2). Загрязнение свинцом в концентрации 100 и 500 мкг/кг на активность фермента в подавляющем большинстве вариантов не оказало достоверного влияния.



**Рис. 1.** Влияние сочетанного загрязнения свинцом и ПеМП на активность каталазы, % от контроля.

**Fig. 1.** Effect of combined contamination on catalase activity by lead and an alternating magnetic field, % of control.

ПеМП как самостоятельный фактор в большинстве случаев не оказало достоверного влияния на активность дегидрогеназы. Ранее было показано, что дегидрогеназа является ферментом, чувствительным к воздействию переменного магнитного поля других уровней [16, 21].

Сочетанное загрязнение для всех уровней магнитного поля и загрязнения свинцом в концентрации 1000, 1500 и 2000 мг/кг оказало подавляющее воздействие на активность дегидрогеназы бурой лесной почвы и серопесков на 15–42% ( $p = 0.00015$ ). Реакция фермента чернозема обыкно-

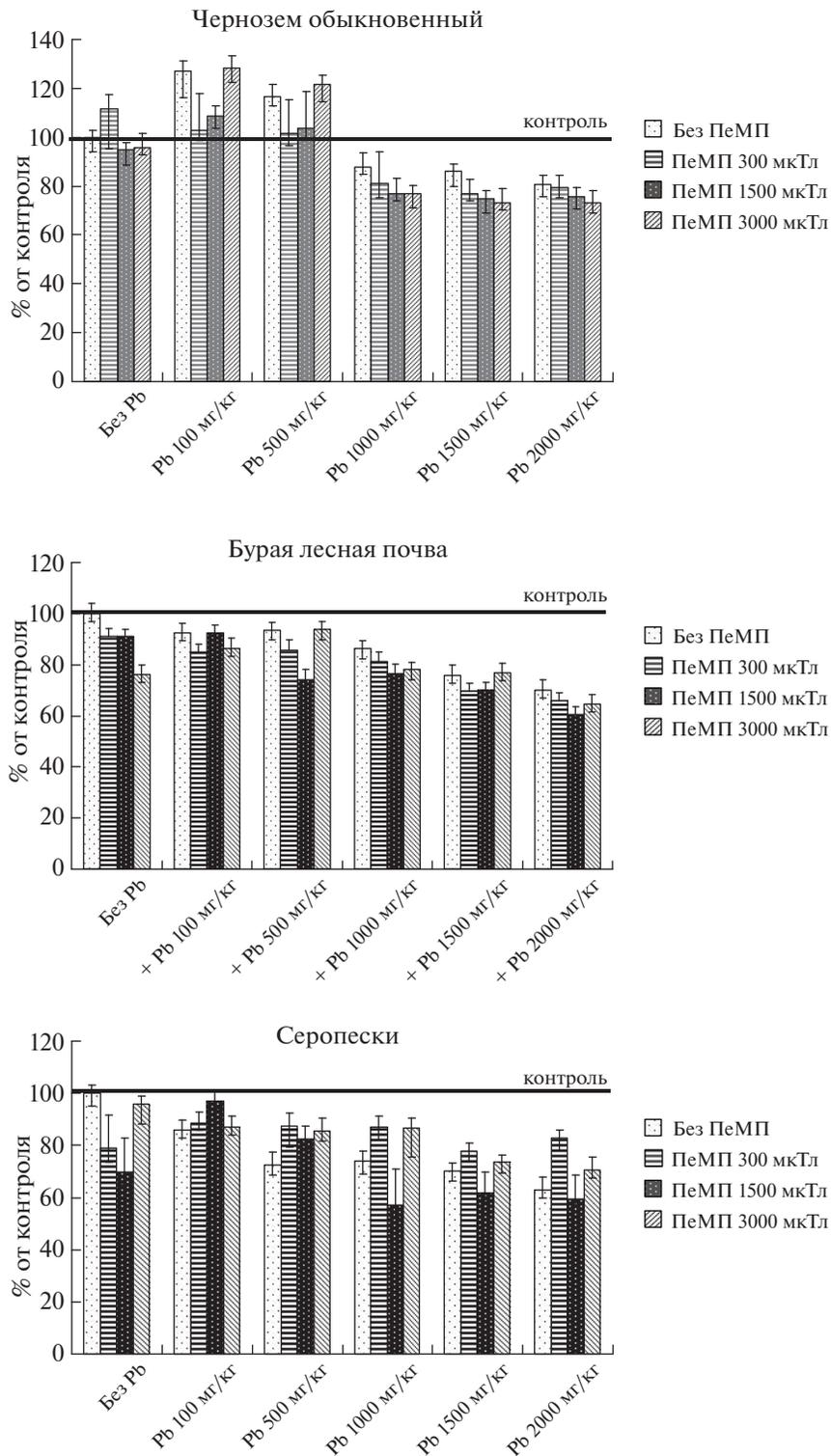


Рис. 2. Влияние сочетанного загрязнения свинцом и ПеМП на активность дегидрогеназы, % от контроля.

Fig. 2. The effect of combined pollution on the activity of dehydrogenase by lead and an alternating magnetic field, % of the control.

венного в большинстве вариантов достоверно не отличалась от контроля.

При сочетанном загрязнении ПеМП не снижало эффект свинцового загрязнения на дегидро-

геназу чернозема, к тому же, при индукции 300 и 1500 мкТл исчезал стимулирующий эффект малых доз свинца. В серопесках при уровнях индукции 300 и 3000 мкТл активность дегидрогеназы

увеличивалась по сравнению с только свинцовым загрязнением.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что вклад взаимодействия загрязнителей в изменение активности дегидрогеназы чернозема обыкновенного составил 15%, серопесков – 22%, для бурой лесной почвы достоверного вклада обнаружено не было ( $p < 0.05$ ). Вклад свинцового загрязнения составил 71, 61 и 70% соответственно. Достоверного вклада ПеМП установлено не было.

**Фитотоксичность почвы.** ПеМП индукцией 300 мкТл приводило к увеличению длины корней редиса на всех почвах на 18–25% (рис. 3). Стимулирующие эффекты электромагнитных полей на рост растений были показаны и ранее при различных уровнях индукции (50 и 300 мкТл, 3–15 и 30 мТл) [22–25].

Внесение в почву свинца вызывало снижение длины корней редиса: на черноземе – до 77–78%, на серопесках – до 64–74%, на бурой лесной почве – до 63–70% соответственно.

Сочетанное загрязнение чернозема при индукции ПеМП 300 мкТл не приводило к изменению картины, появившейся при свинцовом загрязнении. Снижение показателей было заметно при высоких уровнях индукции – 1500 и 3000 мкТл. На серопесках и бурой лесной почве некоторое снижение показателей было заметно только при высоком уровне индукции – 3000 мкТл.

Вклад взаимодействия факторов в изменение фитотоксичности черноземов составил 21% ( $p < 0.05$ ), достоверного вклада для бурой лесной почвы и серопесков обнаружено не было, вклад свинцового загрязнения составил 68, 77 и 66% соответственно, достоверного вклада переменного магнитного поля не отмечено.

**Почвенная микробная биомасса.** Внесение свинца в количестве 100 и 500 мг/кг в бурую лесную почву оказало в ряде случаев стимулирующий эффект – увеличение биомассы на 18–24%. Большие концентрации свинца 1500 и 2000 мг/кг оказали подавляющий эффект на 22–23% ( $p = 0.005$ ;  $p = 0.0004$ ) (рис. 4).

Чувствительность почвенных ферментов к различным типам загрязнений подтверждается и другими исследованиями [2, 20].

Сочетанное влияние ПеМП индукцией 300 и 1500 мкТл и загрязнения свинцом 1 и 5 ПДК оказало во всех вариантах достоверное стимулирующее действие в черноземе на 19–30% ( $p = 0.0007$ ;  $p = 0.0014$ ). В бурой лесной почве в сочетании с ПеМП индукцией 1500 мкТл стимуляция составила 18–30% ( $p = 0.00029$ ;  $p = 0.0014$ ).

Сочетанное воздействие магнитного поля и загрязнения свинцом концентрацией 1500 и 2000 мг/кг вызывало подавляющие эффекты на 20–41%.

Показано, что почвенные микроорганизмы показывают высокую степень чувствительности к разным типам загрязнителей, как химической, так и физической природы [26–30]. Микробная биомасса отражает изменения, происходящие с сообществом почвенных микроорганизмов в целом. Токсическое действие свинца вызывает изменения в физиологии бактериальной клетки, что приводит к изменению скоростей роста и отмирания бактерий, а значит, и количества почвенной биомассы в целом [31].

ПеМП индукцией 300 и 1500 мкТл не оказывало на микробную биомассу исследованных почв достоверного влияния, однако при большем уровне индукции 3000 мкТл отмечалось снижение количества биомассы на 30–36%.

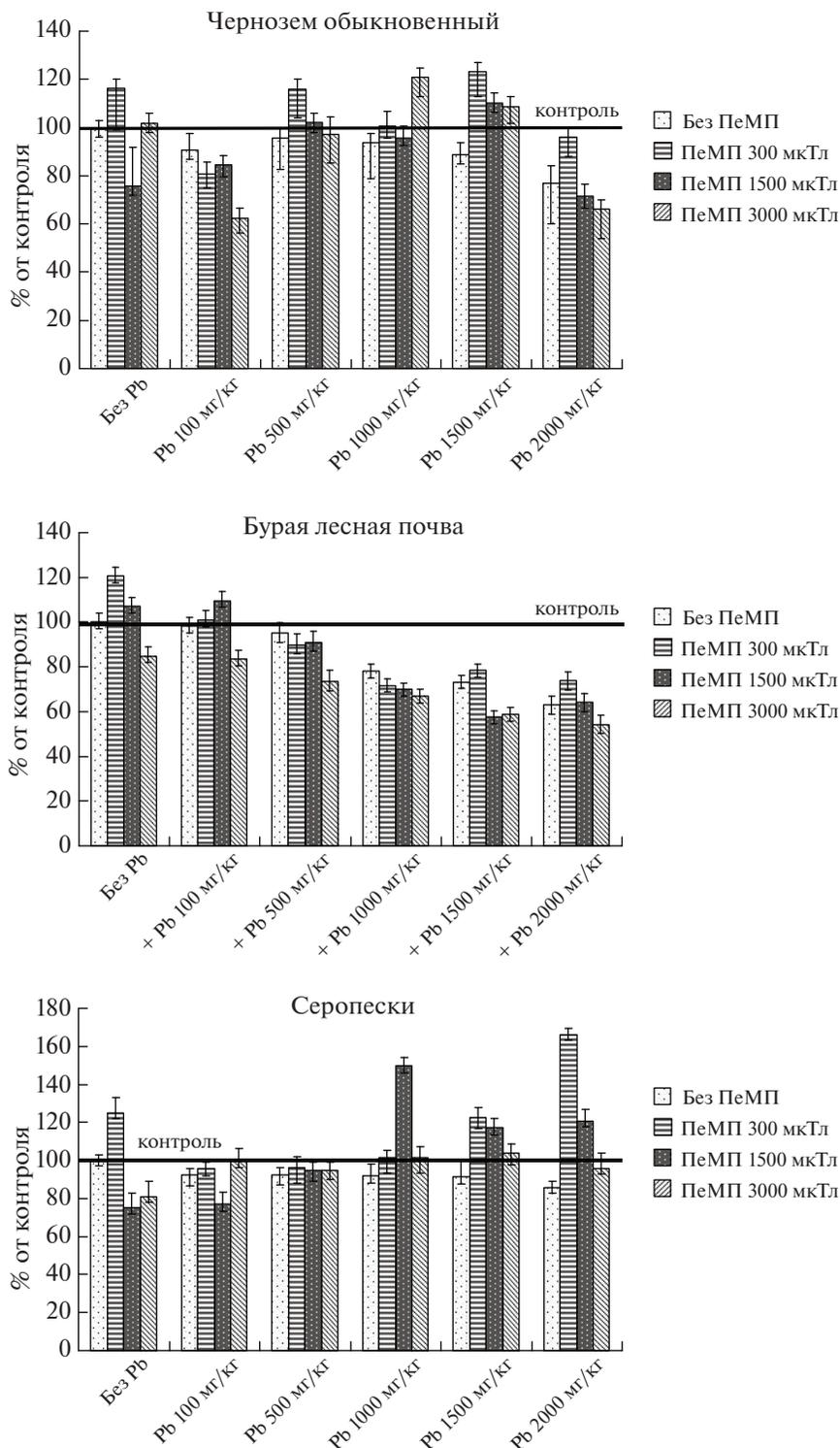
ПеМП индукцией 300 и 1500 мкТл при сочетанном загрязнении приводило к увеличению количества биомассы в почве по сравнению с загрязнением отдельно свинцом. Более того, при малых дозах внесенного свинца отмечался стимулирующий эффект, не проявляющийся ранее. Однако дальнейшее увеличение индукции до 3000 мкТл приводило к снижению количества биомассы по сравнению с загрязнением отдельно свинцом.

Другими исследователями [32] также было показано протекторное действие ЭМП КВЧ-диапазона на микрофлору при сочетанном загрязнении почвы солями тяжелых металлов ( $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{PbCl}_2$ ).

Изменения биомассы бурой лесной почвы при сочетанном загрязнении и при отдельно свинцовом загрязнении практически не отличались, за исключением значения индукции ПеМП 300 мкТл, когда стимулирующего эффекта малых доз не наблюдалось.

Высокие концентрации свинца (1000, 1500, 2000 мг/кг) приводили к уменьшению количества биомассы на 30–38% ( $p = 0.0014$ ). Другими исследователями [33] показано, что свинец в дозах 400 и 1000 мг/кг приводил к подавлению почвенных микроорганизмов и уменьшению метаболического разнообразия микробного сообщества почвы, в конечном счете, к структурным изменениям сообщества почвенных микроорганизмов. Авторы подчеркивают, что такое изменение структуры за счет уменьшения биоразнообразия и утраты некоторых функций может создать угрозу снижения способности микробного сообщества противостоять другим факторам.

Согласно двухфакторному дисперсионному анализу вклад взаимодействия загрязняющих факторов в изменение численности биомассы чернозема составил 27%, бурой лесной почвы – 25% ( $p < 0.05$ ). Вклад свинцового загрязнения – 43 и 50% соответственно, переменного магнитного – 17 и 13% ( $p < 0.05$ ).



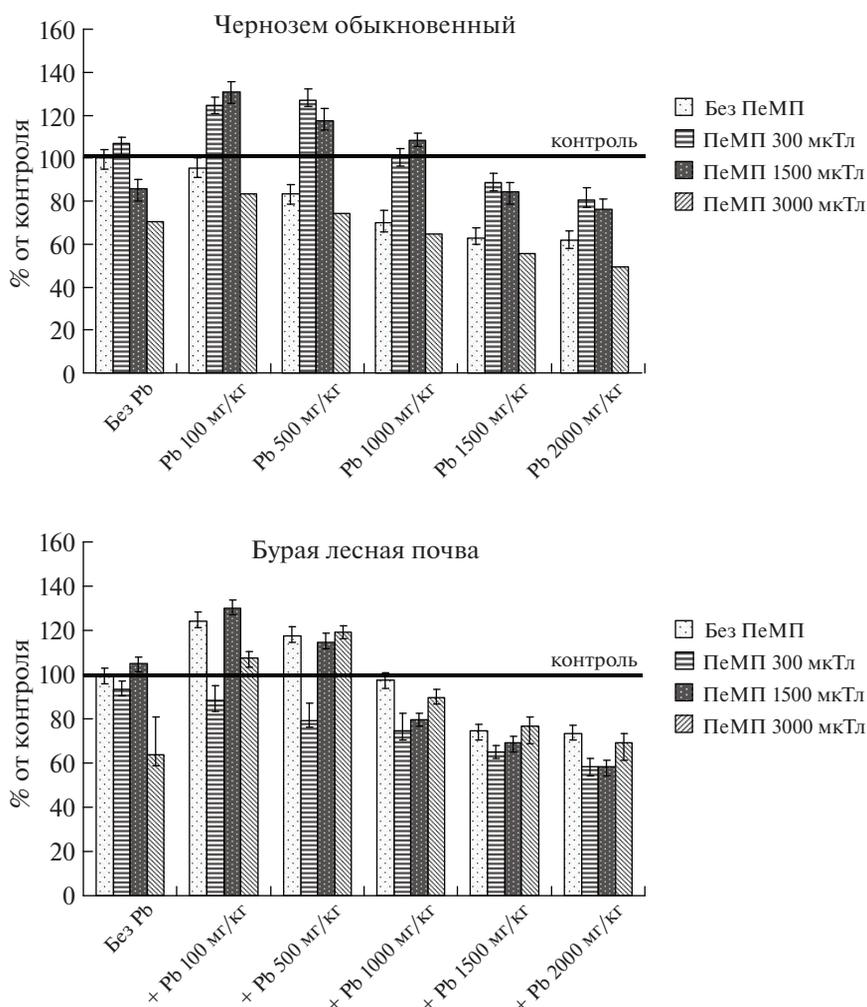
**Рис. 3.** Влияние сочетанного загрязнения свинцом и PEMF на длину корней редиса, % от контроля.  
**Fig. 3.** The effect of combined pollution on the length of radish roots by lead and a variable magnetic field, % of the control.

**ОБСУЖДЕНИЕ**

Несмотря на глобальную распространенность электромагнитных полей в биосфере, проблема электромагнитного загрязнения разработана в настоящее время недостаточно, мало исследова-

ний по взаимодействию ЭМП с другими факторами, в частности, химическими [34, 35].

Тяжелые металлы (ТМ) относятся к наиболее опасным загрязняющим веществам, среди которых повышенной экотоксичностью обладает сви-



**Рис. 4.** Влияние сочетанного загрязнения свинцом и ПеМП на почвенную микробную биомассу, % от контроля.  
**Fig. 4.** Effect of combined pollution on soil microbial biomass by lead and an alternating magnetic field, % of control.

нец. ТМ обладают широким спектром токсического действия, связанного с их физико-химическими свойствами, способностью к образованию прочных соединений и, как следствие, к нарушению проницаемости мембран, ингибированию активности ферментов. Характер и степень воздействия ТМ на почву определяются комплексом факторов: буферной способностью почвы, природой металла, спецификой его взаимодействия с почвенными микроорганизмами, ферментами, растениями [36–41].

Территории, загрязненные свыше 10, а в ряде случаев и свыше 100 ПДК свинца в почве, нередки в районах добычи и переработки свинцовых руд. Кроме того, исследование высоких концентраций свинца в почве необходимо для прогнозирования экологических последствий, в случае

возникновения значительного загрязнения почв, а также имеет фундаментальный интерес.

В нашем исследовании загрязнение свинцом в высоких концентрациях (1000, 1500 и 2000 мг/кг) оказало подавляющее действие на биологические свойства исследованных почв. Причем отличия в воздействии между этими концентрациями были незначительны. Основными механизмами токсичности свинца в высоких концентрациях являются: ингибирование активности ферментов и снижение проницаемости биологических мембран [3, 31, 42].

Малые концентрации свинцового загрязнения (100 и 500 мг/кг) оказали стимулирующее влияние на активность каталазы и почвенную микробную биомассу бурой лесной почвы, активность дегидрогеназы чернозема. В сочетании с переменным магнитным полем стимулирующий

эффект малых концентраций свинцового загрязнения сохранялся.

Анализируя литературные источники и собственные исследования, другие исследователи [34] показали, что максимальное синергетическое взаимодействие факторов будет проявляться в случае, чем меньше интенсивность одного из исследуемых в комбинации агентов и тем меньше должна быть интенсивность другого фактора.

Другими авторами также были показаны стимулирующий эффект малых концентраций свинца на активность ферментов, в частности, уреазы, и подавляющий эффект более высоких концентраций. Причины и механизмы возникновения стимулирующих эффектов малых концентраций свинца объясняют эффектом “малых доз” – “гормезисом” [43].

Гормезис – это обозначение инверсионной биологической, физиологической или биохимической реакции на малые дозы какого-либо воздействия, противоположной той, которая развивается на более высокие дозы [44, 45]. Гормезис относится к немонокотным зависимостям доза–эффект. Он представляет собой двухфазную зависимость доза–эффект, при которой низкие дозы воздействующего фактора оказывают стимулирующее (положительное) влияние, а высокие дозы фактора оказывают ингибирующее, т.е. повреждающее действие [46–49].

В обзоре В.Г. Петина и соавт. [34] были выявлены общие закономерности проявления эффектов комбинированных воздействий, не зависящие от применяемых агентов и изучаемых объектов. В частности, при сочетании различных агентов могут наблюдаться аддитивное, синергетическое и антагонистическое взаимодействия. Чаще наблюдается аддитивное сложение повреждений, индуцированных каждым агентом. Наличие синергетического или антагонистического взаимодействия зависит от соотношения “доз” и/или интенсивностей действующих агентов.

При сочетанном воздействии магнитного поля и химического загрязнения на биологические свойства почв Юга России в ряде случаев мы наблюдали антагонистические эффекты. Однако для разных почв этот эффект был различным. В большей степени его наблюдали на черноземе, в меньшей степени он был зафиксирован для бурой лесной почвы.

Сочетанное действие ЭМП и загрязнения свинцом отличалось от однокомпонентного воздействия. Специфика состояла в том, что магнитное поле модифицировало эффект влияния металла. При низких концентрациях свинца (100 и 500 мг/кг) ЭМП оказывало протекторное действие, т.е. снижало токсичность свинца. При более высоких концентрациях свинца (1000, 1500 и 2000 мг/кг) в ряде случаев наблюдали усиление

негативного влияния свинца в сочетании с ЭМП. Таким образом, переменное магнитное поле не снижало токсические эффекты свинца в высоких дозах, в отличие от комбинированного воздействия со свинцом в низких концентрациях. Объяснение причин и механизмов этих эффектов требует дальнейшего изучения.

## ВЫВОДЫ

1. Переменное магнитное поле индукцией 300, 1500 и 3000 мкТл (50 Гц) как самостоятельный фактор в большинстве случаев не оказало достоверного влияния на ферментативную активность и фитотоксичность чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков.

2. Загрязнение свинцом в концентрации 1000, 1500 и 2000 мг/кг оказывало подавляющее действие на биологические свойства почвы вне зависимости от ее типа. Причем отличия в воздействии между этими концентрациями были незначительны. В отдельных случаях наблюдался стимулирующий эффект малых доз свинца (100 и 500 мг/кг).

3. Сочетанное воздействие магнитного поля и загрязнения свинцом проявилось в том, что магнитное поле модифицировало эффект влияния металла. При низких концентрациях свинца (100 и 500 мг/кг) ЭМП оказывало протекторное действие, т.е. снижало токсичность свинца. При более высоких концентрациях свинца (1000, 1500 и 2000 мг/кг) в ряде случаев отмечали усиление негативного влияния свинца в сочетании с ЭМП. В этом состояла специфика сочетанного действия ЭМП и свинца и его отличие от однокомпонентного.

4. Микрофлора и ферментативные системы серопесков оказались чувствительнее к сочетанному загрязнению, чем остальные исследованные почвы. Это можно объяснить их легким гранулометрическим составом, меньшим содержанием гумуса, слабой оструктуренностью, низкой активностью биологических процессов.

5. При сочетанном загрязнении во всех случаях основной вклад в изменение биологических свойств исследованных типов почв вносило загрязнение свинцом, меньшим был вклад переменного магнитного поля и сочетанного действия факторов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-2511.2020.11).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский Г.В., Карпачевский Л.О., Криксунов Е.А. Геосфера и педосфера. М.: ГЕОС, 2010. 190 с. [*Dobrovolskii G.V., Karpachevskii L.O., Kriksunov E.A. Geosfera i Pedosfera [Geosphere and Pedosphere. Moscow: GEOS Publ, 2010. 190 p. (In Russian)]*]
2. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Ферментативная индикация загрязнения почв тяжелыми металлами // *Агрохимия*. 2006. № 11. С. 11–19. [*Galiulin R.V., Galiulina R.A. Fermentativnaia indikatsiia zagriazneniia pochv tiazhelymi metallami [Enzymatic Indication of Soil Contamination with Heavy Metals] // Agrochemistry. 2006. № 11. P. 11–19. (In Russian)]*]
3. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения. Ростов н/Д: Изд-во Ростиздат, 2006. 385 с. [*Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Ekologicheskoe sostoianie i funktsii pochv v usloviakh khimicheskogo zagriazneniia [Ecological State and Soil Functions in Conditions of Chemical Pollution]. Rostov-on-Don: Rostizdat Publ., 2006. 385 p. (In Russian)]*]
4. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Денисова Т.В. Методология нормирования химического загрязнения почв на основе нарушения их экологических функций // *Экология и промышленность России*. 2007. № 11. С. 48–51. [*Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Denisova T.V. Metodologiya normirovaniia khimicheskogo zagriazneniia pochv na osnove narusheniia ikh ekologicheskikh funktsii [Methodology of Rationing of Chemical Pollution of Soil Based on the Violation of their Ecological Functions] // Ecology and Industry of Russia. 2007. № 11. P. 48–51. (In Russian)]*]
5. Hemida S.K., Omar S.A., Abdel-Mallek A.Y. Microbial populations and enzyme activity in soil treated with heavy metals // *Water, Air, and Soil Pollution*. 1997. V. 95. № 1–4. P. 13–22.
6. Murata T., Kanao-Koshikawa M., Takamatsu T. Effect of Pb, Cu, Sb, Zn and Ag contamination on the proliferation of soil bacterial colonies, soil dehydrogenase activity, and phospholipid fatty acid profiles of soil microbial communities // *Water, Air and Soil Pollution*. 2005. V. 164. P. 103–118.
7. Wang Jin-Hua, Ding Hui, Lu Yi-Tong, Shen Guo-Qing. Combined effects of cadmium and butachlor on microbial activities and community DNA in a paddy soil // *Pedosphere*. 2009. V. 19. № 5. P. 623–630.
8. Бинги В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. М.: МИЛТА, 2002. 592 с. [*Bingi V.N. Magnitobiologiya: eksperimenty i modeli [Magnetobiology: Experiments and Models]. Moscow: MILTA Publ., 2002. 592 p. (In Russian)]*]
9. Григорьев О.А., Бичелдей Е.П., Меркулов А.В. Воздействие антропогенного электромагнитного поля на состояние и функционирование природных экосистем // *Радиация. биология. Радиоэкология*. 2003. Т. 43. № 5. С. 544–551. [*Grigor'ev O.A., Bicheldei E.P., Merkulov A.V. Vozdeistvie antropogennogo elektromagnitnogo polia na sostoianie i funktsionirovanie prirodnykh ekosistem [Impact of Anthropogenic Electromagnetic Field on the State and Functioning of Natural Ecosystems] // Radiation Biology. Radioecology. 2003. V. 43. № 5. pp. 544–551. (In Russian)]*]
10. Redlarski G., Lewczuk B., Zak A et al. The influence of electromagnetic pollution on living organisms: historical trends and forecasting changes // *BioMed Res. Int*. 2015. V. 2015. P. 1–18.
11. Kocaman A., Altu G., Kaplan A.A., et al. Genotoxic and carcinogenic effects of non-ionizing electromagnetic fields // *Environ. Res*. 2018. № 163. P. 71–79.
12. Saliev T., Begimbetova D., Masoud Ab-R., Matkarimov B. Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2018. P. 1–12.
13. Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Колесников С.И. Атлас почв Юга России. Ростов н/Д: Изд-во “Эверест”, 2010. 128 с. [*Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Kolesnikov S.I. Atlas Pochv Iuga Rossii [Atlas of Soils of the South of Russia. Rostov-on-Don: Everest Publ, 2010. 128 p. (In Russian)]*]
14. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Изд-во “Эверест”, 2008. 276 с. [*Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Pochvy Iuga Rossii [Soils of the South of Russia. Rostov-on-Don: Everest Publ., 2008. 276 p. (In Russian)]*]
15. Денисова Т.В., Казеев К.Ш. Влияние переменного и постоянного магнитных полей на биоту и биологическую активность чернозема обыкновенного // *Радиация. биология. Радиоэкология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 345–348. [*Denisova T.V., Kazeev K.Sh. Vliianie peremennogo i postoiannogo magnitnykh polei na biotu i biologicheskuiu aktivnost' chernozema obyknovennogo [The Influence of Alternating and Permanent Magnetic Fields on the Biota and Biological Activity of Ordinary Chernozem] // Radiation Biology. Radioecology. 2007. V. 47. № 3. P. 345–348. (In Russian)]*]
16. Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Влияние электромагнитных полей на биологические свойства почв. Ростов н/Д: ЗАО “Ростиздат”, 2011. 286 с. [*Denisova T.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F. Vliianie Elektromagnitnykh Polei na Biologicheskie Svoistva Pochv [The Influence of Electromagnetic Fields on the Biological Properties of Soil]. Rostov-on-Don: Rostizdat Publ., 2011. 286 p. (In Russian)]*]
17. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. Ин-т биологии Уфим. НЦ. М.: Наука, 2005. 252 с. [*Khaziev F.Kh. Metody Pochvennoi Enzimologii [Methods of Soil Enzymology]. Ufa Institute of Biology. Moscow: Nauka, 2005. 252 p. (In Russian)]*]
18. Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012. 260 с. [*Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Biodiagnostika Pochv: Metodologiya i Metody Issledovaniia [Soil Biodiagnostics: Methodology and Research*

- Methods]. Rostov-on-Don: IuFU Publ., 2012. 260 p. (In Russian)]
19. Колесников С.И., Ярославцев М.В., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка устойчивости биологических свойств черноземов юга России к загрязнению Cr, Cu, Ni, Pb в модельном эксперименте // Почвоведение. 2013. № 2. С. 195. [Kolesnikov S.I., Iaroslavtsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. Sravnitel'naiia otsenka ustoiichivosti biologicheskikh svoystv chernozemov iuga Rossii k zagriazneniiu Cr, Cu, Ni, Pb v model'nom eksperimente [Comparative Assessment of the Sustainability of the Biological Properties of Chernozems of the South of Russia to the Pollution of Cr, Cu, Ni, Pb in a Model Experiment] // Pochvovedenie. 2013. № 2. P. 195. (In Russian)]
  20. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., et al. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions // Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 58. P. 216–234.
  21. Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Устойчивость ферментативной активности и численности микрофлоры разных почв юга России к воздействию переменного магнитного поля промышленной частоты // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 4. С. 481–486. [Denisova T.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F. Ustoiichivost' fermentativnoi aktivnosti i chislennosti mikroflory raznykh pochv iuga Rossii k vozdeistviuu peremennogo magnitnogo polia promyshlennoi chastoty [The Stability of the Enzymatic Activity and the Number of Microflora of Different Soils of the South of Russia to the Effects of an Alternating Magnetic Field of Industrial Frequency] // Radiation Biology. Radioecology. 2008. V. 48. № 4. P. 481–486. (In Russian)]
  22. Трифонова М.Ф., Бляндур О.В., Соловьев А.М. и др. Физические факторы в растениеводстве М.: Колос, 1998. 352 с. [Trifonova M.F., Bliandur O.V., Solov'ev A.M. et al. Fizicheskie Faktory v Rastenievodstve [Physical Factors in Crop Production]. Moscow: Kolos Publ., 1998. 352 p. (In Russian)]
  23. Аксенов С.И., Грунина Т.Ю., Горячев С.Н. О механизмах стимуляции и торможения при прорастании семян пшеницы в электромагнитном поле сверхнизкой частоты // Биофизика. 2007. Т. 52. № 2. С. 332–338. [Aksenov S.I., Grunina T.Yu., Goryachev S.N. About the mechanisms of stimulation and inhibition during germination of wheat seeds in an ultra-low frequency electromagnetic field // Biophysics. 2007. V. 52. № 2. S. 332–338. (In Russian)]
  24. Калинин Л.Г., Бошкова И.Л., Панченко Г.И., Коломийчук С.Г. Влияние низкочастотного и высокочастотного электромагнитного поля на семена // Биофизика. 2005. Т. 50. № 2. С. 361–366. [Kalinin A.V., Shchitov S.V., Voiakin S.N., Shevchenko M.V., Kozlov D.G. Obosnovanie rezhimov teplovogo i elektromagnitnogo vozdeistviia na semena s tsel'iu povysheniia ikh kachestva [Justification of the regimes of thermal and electromagnetic effects on seeds in order to improve their quality] // Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2018. № 3 (46). P. 136–140. (In Russian)]
  25. Dayal S., Singh R.P. Effect of seed exposure to magnetic field on the height of tomato plants // Ind. J. Agricul. Sci. 1986. V. 56. № 6. P. 483–486.
  26. Сви́рскаене А. Микробиологические и биохимические показатели при оценке антропогенного воздействия на почвы // Почвоведение. 2003. № 2. С. 202–210. [Svirskene A. Mikrobiologicheskie i biokhimicheskie pokazateli pri otsenke antropogennogo vozdeistviia na pochvy [Microbiological and Biochemical Parameters in Assessing the Anthropogenic Effects on the Soil] // Eurasian Soil Science. 2003. № 2. P. 202–210. (In Russian)]
  27. Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Содержание и структура микробной биомассы как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. № 6. С. 706–714. [Polianskaia L.M., Zviagintsev D.G. Soderzhanie i struktura mikrobnoi biomassy kak pokazatel' ekologicheskogo sostoianiiia pochv [The Content and Structure of Microbial Biomass as an Indicator of the Ecological State of the Soil] // Eurasian Soil Science. 2005. № 6. P. 706–714. (In Russian)]
  28. Терехова В.А. Микромитеты в экологической оценке водных и наземных экосистем. М.: Наука, 2007. 215 с. [Terekhova V.A. Mikromitsety v ekologicheskoi otsenke vodnykh i nazemnykh ekosistem [Micromycetes in the Ecological Assessment of Aquatic and Terrestrial Ecosystems]. Moscow: Nauka Publ., 2007. 215 p. (In Russian)]
  29. Hassanein W.A., Ali A.A. Study of influence of electric field exposure on some soil microbial activities // Soil Biol. Biochem. 2003. P. 1–13.
  30. Благодатская Е., Кузьяков Ю. Активные микроорганизмы в почве: критический обзор критериев и подходов // Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 67. P. 192–211.
  31. Громов Б.В., Павленко Г.В. Экология бактерий. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1989. 248 с. [Gromov B.V., Pavlenko G.V. Ekologiya bakterii [Ecology of bacteria]. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1989. 248 p. (In Russian)]
  32. Чесноков И.А., Елисеев Ю.Ю., Ляпина Е.П. и др. Экологические проблемы, связанные с изучением сочетанного воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокочастотного диапазона и солей тяжелых металлов на микробиологические объекты // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 5 (3). С. 857–859. [Chesnokov I.A., Eliseev Yu.Yu., Liapina E.P., Bushuev N.A., Kutuzova G.A., Khramova Iu.D. Ekologicheskie problemy, svyazannye s izucheniem sochetannogo vozdeistviia nizko intensivnogo elektromagnitnogo izlucheniia kraine vysokochastotnogo diapazona i solei tiazhelykh metallov na mikrobiologicheskie ob'ekty [Environmental problems associated with the study of the combined effects of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency range

- and heavy metal salts on microbiological objects] // *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2012. V. 14. № 5 (3). P. 857–859. (In Russian)]
33. *Благодатская Е.В., Пампура Т.В., Демьянова Е.Г., Мякшина Т.Н.* Влияние свинца на ростовые характеристики микроорганизмов почвы и ризосферы *Dactylis glomerata* // *Почвоведение*. 2006. № 6. С. 726–734. [*Blagodatskaya E.V., Pampura T.V., Demyanova E.G., Myakshina T.N.* Vliyanie svyntsa na rostovye kharakteristyku mikroorganizmov pochvy i ryzosfery *Dactylis glomerata* [The effect of lead on the growth characteristics of soil and rhizosphere microorganisms *Dactylis glomerata*] // *Soil Science*. 2006. № 6. P. 726–734. (In Russian)]
  34. *Петин В.Г., Дергачева И.П., Жураковская Г.П.* Комбинированное биологическое действие ионизирующих излучений и других вредных факторов окружающей среды (научный обзор) // *Радиация и риск*. 2001. Вып. 12. С. 117–134. [*Petin V.G., Dergacheva I.P., Zhurakovskaya G.P.* Kombinirovannoye biologicheskoye deistvie ioniziruyuchix izlucheni i drugyh vrednykh factorov [The combined biological effect of ionizing radiation and other harmful environmental factors (scientific review)] // *Radiation and risk*. 2001. Issue. 12. P. 117–134. (In Russian)]
  35. *Хижанков П.К., Добрица Н.В., Нецветов М.В.* Сочетанное действие переменных магнитных полей и некоторых химических веществ на прорастание ячменя // *Электронная обработка материалов*. 2004. № 4. С. 83–86. [*Khizhenkov P.K., Dobritsa N.V., Netsvetov M.V.* Sochetannoye deystviye peremennykh magnitnykh polei i nekotorykh himicheskikh vechestv na prorastanye yachmenya [The combined effect of alternating magnetic fields and some chemicals on the germination of barley] // *Electronic Processing of Materials*. 2004. № 4. P. 83–86. (In Russian)]
  36. *Водяницкий Ю.Н.* Соединения As, Pb и Zn в загрязненных почвах (по данным EXAFS-спектроскопии – обзор литературы) // *Почвоведение*. 2006. № 6. С. 681–691. [*Vodyanitsky Yu.N.* Soedineniya As, Pb, and Zn v zagryaznennykh pochvax [Compounds of As, Pb, and Zn in contaminated soils (According to EXAFS Spectroscopy – Literature Review)] // *Soil Science*. 2006. № 6. P. 681–691. (In Russian)]
  37. *Копцик Г.Н.* Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2014. № 7. С. 851–868. [*Koptsik G.N.* Sovremennyye podhody k remediacii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallamy [Modern approaches to remediation of soils contaminated with heavy metals (literature review)] // *Soil Science*. 2014. № 7. P. 851–868. (In Russian)]
  38. *Fodor L., Láposi R., & Tury R.* Heavy metal tolerance and accumulation in field crops // *Cereal Research Communications*. 2009. V. 37. P. 521–524.
  39. *Haddad S.A., Tabatabai M.A., Loynachan T.E.* Effects of liming and selected heavy metals on ammonium release in waterlogged agricultural soils // *Biology and Fertility of Soils*. 2017. V. 53. № 2. P. 153–158.
  40. *Dietterich L., Gonneau C., & Casper B.* Arbuscular mycorrhizal colonization has little consequence for plant heavy metal uptake in contaminated field soils // *Ecol. Applicat.* 2017. V. 27. № 6. P. 1862–1875.
  41. *Schaeffer R., & Esbenshade J.* A quantitative analysis of the uptake of heavy metals into common garden vegetables from contaminated soils // *J. Pennsylvania Acad. Sci.* 2018. V. 92. № 2. P. 111–135.
  42. *Kushwaha Anamika, Hans Nidhi, Kumar Sanjay, Rani Radha.* A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies // *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2018. V. 147. P. 1035–1045.
  43. *Jinlong Yan, Guixiang Quan, Cheng Ding.* Effects of the combined pollution of lead and cadmium on soil urease activity and nitrification // *Procedia Environ. Sci.* 2013. V. 18. P. 78–83.
  44. *Булдаков Л.А., Калустратова В.С.* Радиационное воздействие на организм – положительные эффекты. М.: Информ-Атом, 2005. 246 с. [*Buldakov L.A., Kalistratova V.S.* Radiation effects on the body – positive effects. M.: Inform-Atom, 2005. 246 p. (In Russian)]
  45. *Belz Regina G., Sinkkonen Aki.* Low toxin doses change plant size distribution in dense populations – Glyphosate exposed *Hordeum vulgare* as a greenhouse case study // *Environ. Int.* 2019. V. 132. P. 1–12.
  46. *Эйдус Л.Х., Эйдус В.Л.* Проблемы механизма радиационного и химического гормезиса // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2001. Т. 41. № 5. С. 627–630. [*Eidus L.Kh., Eidus V.L.* Problemy mekhanizmov radiacyonnogo i himicheskogo gormezisa [Problems of the mechanism of radiation and chemical hormesis] // *Radiation biology. Radioecology*. 2001. V. 41. № 5. P. 627–630. (In Russian)]
  47. *Эйдус Л.Х.* О механизме неспецифической реакции клеток на действие повреждающих агентов и природе гормезиса // *Биофизика*. 2005. Т. 50. Вып. 4. С. 693–703. [*Eidus L.Kh.* O mekhanizme nespecyficheskoi reakcii kletok na deystvie povrezhdauchyx agentov [About the mechanism of nonspecific reaction of cells to the action of damaging agents and the nature of hormesis] // *Biophysics*. 2005. V. 50. Issue 4. P. 693–703. (In Russian)]
  48. *Cedergreen N., Streibig J.C., Kudsk P. et al.* The occurrence of hormesis in plants and algae // *Dose Response*. 2007. № 5. P. 150–162.
  49. *Calabrese E.J.* Hormesis: why it is important to toxicology and toxicologists // *Environ. Toxicol. Chem.* 2008. V. 27. № 7. P. 1451–1474.

## **Influence of Combined Effects of Variable Magnetic Field and Lead Pollution on the Biological Properties of Soils in the South of Russia**

**T. V. Denisova<sup>a,\*</sup>, M. S. Mazanko<sup>a</sup>, and S. I. Kolesnikov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: denisova777@inbox.ru*

In model experiments, the influence of combined effect of lead contamination with a concentration of 100, 500, 1000, 1500, 2000 mg/kg and an variable magnetic field of industrial frequency (50 Hz) by induction of 300, 1500 and 3000 mкТ on the enzymatic activity, microbial soil biomass and phytotoxicity of chernozem ordinary, brown forest soil and seropeski. Depending on the concentration of lead and the level of induction of an variable magnetic field, factors had both a synergistic and antagonistic effect. The most sensitive to the combined pollution were seropeski. The main contribution to the change in biological properties was made by lead pollution; the contribution from variable magnetic field and the combined effect of factors was smaller.

**Keywords:** variable magnetic field, lead pollution, soil microflora, soil enzymes, ordinary chernozem, brown forest soil, gray sands