

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРЕДЫСТОРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ С ИХ АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬЮ

© 2020 г. Г. Н. Федотов<sup>а, \*</sup>, И. В. Горепекин<sup>а</sup>, А. Д. Позднякова<sup>б</sup>,  
Ю. А. Завгородняя<sup>а</sup>, С. А. Исакова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Всероссийский НИИ мелиорированных земель, п. Эммаусс, 27, 170530 Россия

\*e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

После доработки 10.07.2019 г.

Принята к публикации 20.10.2019 г.

Изучено влияние предыстории и химических свойств почв на их аллелотоксичность. В исследовании использовали 12 образцов почв Русской равнины, 6 сортов семян яровой пшеницы, а также ячменя, ржи и тритикале. Установлено, что все изученные зерновые культуры однотипно ингибируются токсинами, содержащимися в почвах. Территории сельскохозяйственного использования независимо от выращиваемых культур характеризовались значительно большей аллелотоксичностью по сравнению с залежными и лесными участками. Полученные данные позволяют предположить, что применение севооборотов не всегда способно снизить почвоутомление. Это делает необходимым проведение оценки реального почвоутомления (аллелотоксичности почв) при применении севооборотов. Проведенная статистическая обработка данных свидетельствует о влиянии совокупности химических свойств почв на ингибирование прорастания семян и развития их проростков.

*Ключевые слова:* почвоутомление, замедление развития проростков, севооборот

DOI: 10.31857/S0032180X2003003X

### ВВЕДЕНИЕ

При решении вопроса повышения плодородия почв принимается во внимание ее агрофизическое состояние, агрохимические и физико-химические свойства. Как следствие, практически все разработанные модели повышения продуктивности агрофитоценозов основаны на оптимизации именно этих показателей [9]. Однако почву нельзя рассматривать только как субстрат для влаги, воздуха и питательных элементов, необходимых растениям. Почвенная среда — один из наиболее активных компонентов биосферы, она полна жизнью, обладает высокой биохимической активностью, и живая часть почвенной среды в огромной степени определяет плодородие почв [10].

В настоящее время можно считать твердо установленным, что продуктивность агроэкосистем в значительной степени зависит от образования биологически активных веществ, их накопления в почвах и действия на растения [9]. В первую очередь речь идет о накоплении в почвах аллелотоксинов и вызванном этим почвоутомлении [1–3, 5, 18, 22, 24].

До середины прошлого столетия большого интереса к явлению почвоутомления не проявлялось. По-видимому, в определенной степени это было связано с успехами химизации, на фоне ко-

торых данная проблема казалась незначительной. Стали доминировать идеи о том, что в условиях высокой степени химизации, развития мелиорации и интенсивной обработки почвы необходимость чередования культур, а, следовательно, и проблема почвоутомления перестанут существовать [10]. Это было одной из причин, по которой изучению вопроса аллелотоксичности почв уделяли недостаточно внимания, не учитывая широкое распространение данного явления [5] и того, что оно является важным дополнительным фактором повышения плодородия почв<sup>1</sup> [9].

Другой причиной стала сложность изучения аллелотоксичности почв, основанная на невозможности использования методов химического анализа для определения наличия аллелотоксичности и ее величины. Применение метода вытяжек из почв позволяет установить в них наличие аллелотоксинов, но их индивидуальные концентрации соответствуют областям стимуляции, а не угнетения<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> По данным ФАО потери урожая от аллелотоксичности (токсикоза) почв в мире составляют в отдельные годы до 25%, и это явление — потенциально одна из самых больших угроз для мирового сельского хозяйства [10].

<sup>2</sup> Это объясняется тем, что аллелотоксины действуют в виде многокомпонентной смеси, эффект от которой не является простой суммой эффектов отдельных ее компонентов.

Поэтому основными способами изучения аллелотоксичности почв стали методы биотестирования. В большинстве случаев изучают влияние вытяжек из почв на прорастание семян и начальную стадию развития их проростков на полуколичественном уровне. Однако получаемые подобным образом результаты по аллелотоксичности почв хорошо соответствуют плодородию этих почв (коэффициент корреляции превышает 0.9) и урожайности на них сельскохозяйственных культур [6, 9].

В связи с тем, что разработана более совершенная методика, позволяющая получать количественную информацию об аллелотоксичности почв [16], представляло интерес изучить влияние предыстории и химических свойств почв на их аллелотоксичность.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на семенах яровой пшеницы (*Triticum*) сортов “Лиза”, “Злата”, “Эстер”, “Агата”, “Любава” и “РИМА”, озимого тритикале (*Triticosecale*) сорта “Немчиновский 56”, ярового ячменя (*Hordeum*) сорта “Нур” и озимой ржи (*Secale cereale*) сорта “Татьяна”.

В работе использовали образцы следующих почв: окультуренной дерново-подзолистой глубокоподзолистой глубокопахотной легкосуглинистой на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями, после викоовсяной смеси (1), после горчицы (2), после картофеля (3), после ячменя (4); дерново-неглубокоподзолистой освоённой глубокопахотной легкосуглинистой на покровных суглинках, подстилаемых мореной, залежь с 2015 г. (5); дерново-неглубокоподзолистой освоённой глубокопахотной легкосуглинистой на покровных суглинках, подстилаемых мореной, залежь, иллювиальный горизонт (6); дерново-подзолистой освоённой глубокопахотной сильносымьтой на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями после картофеля с 2015 (7); глубокодерново-подзолистой слабодифференцированной легкосуглинистой на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями, старопахотная под лесом, подстилка (8); агродерново-глубокоподзолистой супесчаной на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях, подстилаемой с глубины 92 см бескарбонатными лёссовидными (покровными) суглинками после пшеницы (9); чернозема типичного среднемощного среднесуглинистого на лёссовидных суглинках после картофеля (10); серой лесной освоённой слабосымьтой среднесуглинистой на лёссовидных суглинках, подстилаемых мореной после пшеницы (11); каштановой среднемощной легкосуглинистой на элюво-делювиальных суглинках, залежь (12). Предполагали, что такое разнообразие объектов позволит лучше по-

нять причины возникновения аллелотоксичности почв.

Также в работе использовали отмытый речной песок с частицами 0.5–0.8 мм, так как для оценки аллелотоксичности почв необходима точка отсчета, т.е. субстрат, который не содержит токсинов.

Было изучено влияние почв на изменение длины проростков<sup>3</sup> 7.5 г семян (~200 шт.) при их прорастании в различных почвах по сравнению с песком. Длину проростков определяли, используя экспресс-метод, основанный на существовании линейной зависимости между насыпным объемом проросших семян в воде и длиной их проростков [16]. Проросшие в почве или песке семена отмывали от субстрата и помещали порциями в мерный цилиндр на 100 мл с водой, размещенный на вибростол<sup>4</sup>, колеблющемся с частотой 50 Гц. После помещения каждой порции проросших семян в цилиндр, которые создавали ажурную пористую структуру на них на 15–20 с помещали небольшой груз массой 8 г в виде резиновой пробки, что приводило к уплотнению структуры. После помещения всех проросших семян в цилиндр на них клали груз и проводили дополнительное уплотнение структуры легкими постукиваниями (30–40) цилиндра с семенами о стол. Эти операции позволяли создать достаточно однородную структуру, а нижняя граница груза позволяла определять насыпной объем с точностью до 0.5 мл.

При проведении экспериментов на дно чашки диаметром 95 мм помещали 30 г почвы или песка, затем ровным слоем размещали 7.5 г семян, а сверху – 30 г почвы или песка соответственно. После этого в чашку равномерно добавляли из мерной пипетки воду. Использовали шестикратную повторность с последующей статистической обработкой результатов. В связи с использованием в одном опыте 1000–1200 семян удавалось минимизировать ошибку, связанную с их разным качеством [14]. В результате ошибка опыта не превышала 7% при 95%-ной доверительной вероятности. Большинство экспериментов проводили при температуре 23–26°C.

Хорошо известно, что существенным фактором, влияющим на скорость прорастания семян, является влажность почв. Очевидно, что при недостаточной влажности прорастание семян и развитие проростков будут замедляться из-за недостатка воды, а при избыточной влажности из-за недостатка кислорода. Поэтому сравнение субстратов, обладающих различным средством к влаге (песка и почв), может быть корректно только в

<sup>3</sup> По мнению физиологов растений [11] до момента прорастания семян используются вещества, уже запасенные в них.

<sup>4</sup> Небольшой вибростол был изготовлен из электрического пускателя путем ограничения возможности магнитной катушки фиксировать сердечник в крайнем нижнем положении, что приводило к вибрации сердечника.

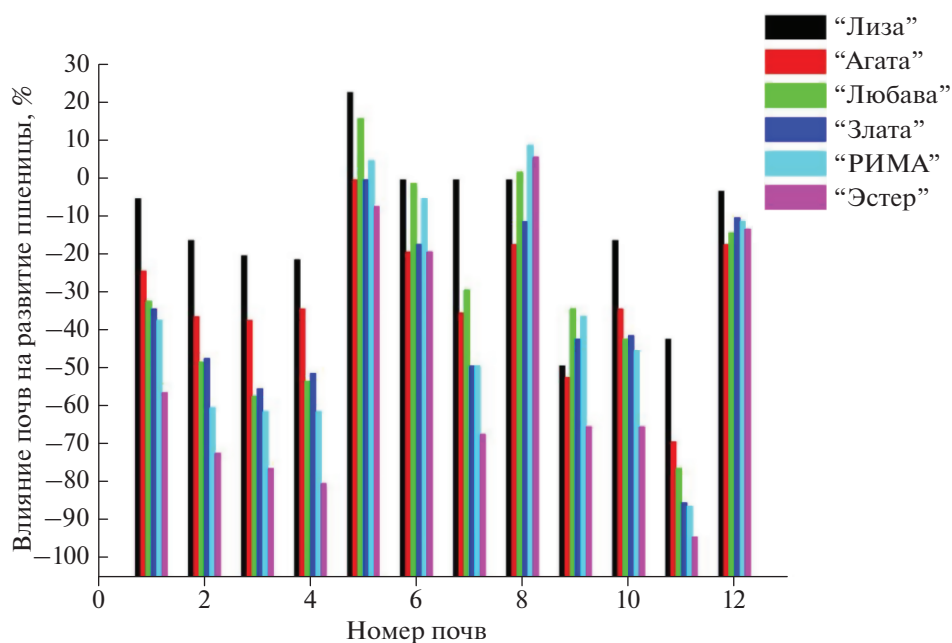


Рис. 1. Влияние почв на прорастание семян и развитие проростков пшеницы разных сортов. Номера почвы см. табл. 1.

точках, обеспечивающих оптимальные водно-воздушные условия и, соответственно, максимальную скорость развития в них семян. Оптимальное исходное количество воды для субстратов определяли по максимуму выделения углекислоты при прорастании семян в зависимости от содержания воды в субстрате [17].

Из химических свойств почв определяли pH KCl, содержание обменного калия, подвижного фосфора, обменного кальция, общее содержание углерода, азота и серы. Измерение pH и содержания в почвах калия ( $K_2O$ ), фосфора ( $P_2O_5$ ) и подвижного кальция проводили по стандартным методикам [12, 15] с использованием фотоколориметра КФК-3 и пламенного фотометра ПФМ. Определение содержания в почвах N, S, C проводили на CHNS-анализаторе Vario EL III, Elementar, Germany.

Для выявления зависимости ингибирования семян яровых пшениц от химических свойств почв применяли корреляционный и регрессионный анализы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный перед изучением аллелотоксичности почв химический анализ показал (табл. 1), что обеспеченность почв элементами питания достаточна для проведения испытаний, и химические свойства почв не могут лимитировать развитие семян.

Результаты по изучению влияния почв на прорастание семян пшеницы и развития их пророст-

ков представлены в табл. 2. На основе этих данных были построены кривые ингибирования различных сортов пшеницы изученными почвами (рис. 1). Хорошо видно, что сорта различаются по своему отношению к аллелотоксинам. Одни из них проявляют большую устойчивость к комплексу аллелотоксинов на всех почвах (сорт “Лиза”), а другие на всех почвах сильнее угнетаются аллелотоксинами (“Эстер”). Остальные сорта пшеницы занимают промежуточное положение.

Обращает на себя внимание отсутствие хаотичности в реакции сортов на комплексы аллелотоксинов различных почв. Практически не встречаются результаты, когда на какой-либо почве более устойчив к аллелотоксинам один сорт, а на другой почве этот сорт угнетается сильнее прочих.

Видно, что последовательность ингибирования сортов аллелотоксинами примерно сохраняется для каждой почвы, хотя соотношение между величинами ингибирования для разных сортов на почвах может отличаться. Явно прослеживается однотипность изменения ингибирования разных сортов яровой пшеницы, что подтверждается и тесной корреляцией между ними. Коэффициенты корреляции близки к единице (табл. 3). Этот факт позволяет в дальнейшем для исследования брать не все сорта, а только наиболее характерные.

Например, “Эстер” коррелирует со “Златой”, “РИМОЙ” и “Любавой” с коэффициентом корреляции 0.940–0.977. С сортами “Лиза” и “Агата” корреляция меньше. Таким образом, для изучения влияния аллелотоксичности почв на прорастание

Таблица 1. Химические свойства исследованных в работе почв

№ почвы	Наименование почвы (по классификации почв СССР 1977 г.)	Предыстория использования	pH <sub>KCl</sub>	Ca <sub>обм</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> полев мг/100 г	K <sub>2</sub> O <sub>обм</sub>	N <sub>обш</sub>	S <sub>обш</sub>	C <sub>обш</sub>
1	Окультуренная дерново-подзолистая глубокоподзолистая легкоуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями	Викоовесная смесь	6.2	208	31.5	36.9	0.29	0.09	3.33
2	»	Горчица	6.3	216	32.5	25.9	0.35	0.10	3.91
3	»	Картофель	5.9	167	31.5	29.8	0.23	0.07	2.57
4	»	Ячмень	6.1	117	31.0	22.0	0.20	0.06	2.23
5	Дерново-неглубокоподзолистая освоенная глубокопахотная легкоуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной (гумусово-аккумулятивный горизонт)	Залежь с 2015 г.	5.5	83	14.5	6.48	0.17	0.05	1.82
6	Иллювиальный горизонт почвы 5	Залежь с 2015 г.	5.1	67	3.0	3.25	0.04	0.02	0.26
7	Дерново-подзолистая освоенная глубокопахотная сильноносмытая на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями	После картофеля с 2015 г.	5.1	67	17.5	7.15	0.17	0.04	1.71
8	Глубокодерново-подзолистая слабодифференцированная легкоуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями (лесная подстилка)	Старопахотная почва под лесом	3.6	117	6.0	11.0	1.18	0.39	35.1
9	Агрдерново-глубокоподзолистая супесчаная на водноледниковых (древнеозерных) отложениях, подстилаемых с глубины 92 см бескарбонатными лёссовидными (покровными) суглинками	Пшеница	6.6	133	29.0	19.4	0.14	0.05	1.65
10	Чернозем типичный среднемошный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках	Картофель	5.3	316	4.0	—	0.24	0.08	3.58
11	Серая лесная освоенная слабосмытая среднесуглинистая на лёссовидных суглинках, подстилаемых мореной	Пшеница	5.0	100	18.5	15.5	0.12	0.05	1.07
12	Каштановая среднемошная легкоуглинистая на элюводелювиальных суглинках	Залежь	6.2	150	5.5	11	0.09	0.05	0.80

**Таблица 2.** Воздействие на семена яровой пшеницы биологически активными веществами почв, определяемое по изменению суммарной длины проростков массива семян за двое суток на почвах по сравнению с песком, %

№ почвы	Сорт					
	“Лиза”	“Агата”	“Любава”	“Злата”	“РИМА”	“Эстер”
1	-5 ± 5	-24 ± 5	-32 ± 5	-34 ± 5	-37 ± 5	-56 ± 6
2	-16 ± 5	-36 ± 6	-48 ± 6	-47 ± 6	-60 ± 6	-72 ± 7
3	-20 ± 6	-37 ± 5	-57 ± 7	-55 ± 7	-61 ± 6	-76 ± 7
4	-21 ± 5	-34 ± 5	-53 ± 7	-51 ± 6	-61 ± 7	-80 ± 6
5	23 ± 6	0 ± 6	16 ± 5	0 ± 5	5 ± 5	-7 ± 5
6	0 ± 5	-19 ± 5	-1 ± 5	-17 ± 5	-5 ± 5	-19 ± 5
7	0 ± 5	-35 ± 6	-29 ± 6	-49 ± 6	-49 ± 6	-67 ± 6
8	0 ± 5	-17 ± 6	2 ± 5	-11 ± 5	9 ± 5	6 ± 5
9	-49 ± 7	-52 ± 7	-34 ± 6	-42 ± 6	-36 ± 5	-65 ± 6
10	-16 ± 6	-34 ± 6	-42 ± 6	-41 ± 7	-45 ± 6	-65 ± 7
11	-42 ± 6	-69 ± 6	-76 ± 7	-85 ± 7	-86 ± 7	-94 ± 7
12	-3 ± 5	-17 ± 5	-14 ± 5	-10 ± 5	-11 ± 5	-13 ± 5

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции между разными сортами Яровой пшеницы

Сорт	“Лиза”	“Агата”	“Любава”	“Злата”	“РИМА”	“Эстер”
“Лиза”	1	0.918	0.778	0.759	0.690	0.718
“Агата”	0.918	1	0.866	0.921	0.837	0.832
“Любава”	0.778	0.866	1	0.954	0.974	0.940
“Злата”	0.759	0.921	0.954	1	0.967	0.944
“РИМА”	0.690	0.837	0.974	0.967	1	0.977
“Эстер”	0.718	0.832	0.940	0.944	0.977	1

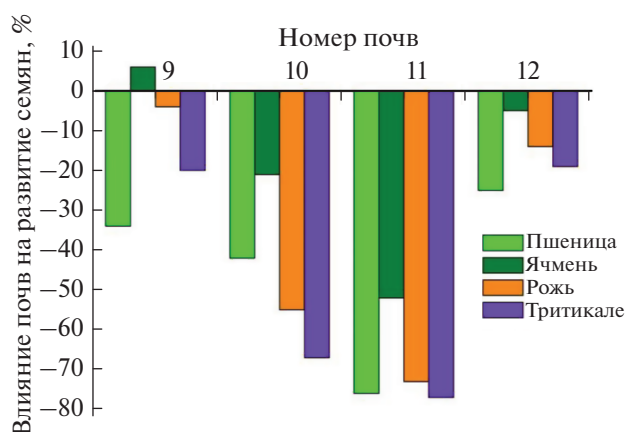
семян и развитие их проростков достаточно использовать сорта: “Эстер”, “Лиза” и “Агата”.

Данные, полученные на ячмене, тритикале, ржи и пшенице на зональных почвах (рис. 2), свидетельствуют, что упорядоченность воздействия комплекса аллелотоксинов, наблюдающаяся для яровой пшеницы, сохраняется и для этих зерновых культур. Подобные результаты позволяют предположить существование единой природы ответной реакции изученных зерновых культур на комплексы аллелотоксинов.

Из наблюдаемой упорядоченности следует, что культура (сорт), более устойчивые к аллелотоксинам одной почвы будут устойчивее к аллелотоксинам другой. В связи с этим при выборе культур и сортов для посева на конкретных почвах при существовании порядка в их расположении в ряду устойчивости к аллелотоксинам имеет смысл оценивать значимость различий в их реакции на конкретный для изучаемой почвы комплекс аллелотоксинов. Это значительно упрощает выбор сортов (культур) при наличии данных о порядке их расположении в ряду устойчивости, полученных на любой почве.

Из представленных данных хорошо видно, что наименьшая величина ингибирования для участ-

ков, на которых используется четырехпольный севооборот, наблюдается для участка 1, где предшественником в севообороте выступала викоовсяная смесь. Однако в соответствии с севооборотом пшеницу планируется высевать после картофеля на участке 3, где значение ингибирования

**Рис. 2.** Влияние почв на прорастание семян и развитие проростков пшеницы сорт “Любава”, ячменя сорт “Нур”, ржи сорт “Татьяна” и тритикале сорт “Немчиновский 56”.

**Таблица 4.** Продуктивность биомассы растений в степи и в посевах Центрального черноземного заповедника [9]

Угодье и культура	Продукция	Урожай		Вынос элементов, кг/га	
		ц/га	сырого протеина, ц/га	азот	фосфор
Степь косимая	Сухое вещество	23.7	2.0	31	7
Степь некосимая	Сухое вещество	29.7	2.6	42	9
Озимая пшеница	Общий урожай	109.1	9.0	143	54
Сахарная свекла	Общий урожай	619.0	10.0	167	44
Кукуруза	Зеленая масса	341.0	5.1	81	33

заметно выше для всех шести сортов. Эти данные свидетельствуют, что использование севооборотов без контроля аллелотоксичности полей может не давать положительного результата по повышению урожайности. Только совмещение севооборотов с контролем аллелотоксичности участков позволит подобрать севообороты наиболее пригодные для конкретных условий.

Обращает на себя внимание, что аллелотоксичность почв значительно выше для территорий сельскохозяйственного использования независимо от того, какие культуры на них выращивали. Это характерно для всех изученных сортов пшеницы, а также тритикале, ржи и ячменя. Минимальные значения аллелотоксичности наблюдаются для залежи (образцы почв 5 и 12), а также для подстилки под лесом (образец почвы 8). Причем для наиболее устойчивых к аллелотоксинам культур на таких почвах наблюдается не ингибирование, а стимуляция прорастания семян и развития их проростков почвами.

Полученные данные подтверждают мнение о том, что явление аллелотоксичности не характерно для естественных климаксовых растительных сообществ. В естественных фитоценозах отношения между растениями и почвенной средой сложились в процессе эволюции. Вследствие этого они отлажены, урегулированы, относительно устойчивы. Энергия и вещество, образующиеся при фотосинтезе, последовательно перераспределяются и потребляются компонентами фитоценоза [10]. Почва — элемент биосферы, насыщенный жизнью, и имеет специфический обмен веществ, в котором растения играют важную роль [13]. При одностороннем воздействии на почву этот обмен нарушается. Таким образом, общая причина почвоутомления представляется как нарушение процесса обмена веществ и энергии в системе почва—растение [10]. Негативное влияние на почвы любых видов сельскохозяйственного использования связано с этими нарушениями обмена вещества и энергии из-за того, что продуктивность агроценозов в несколько раз превышает продуктивность естественных фитоценозов (табл. 4). Это выводит экосистему из состояния равновесия, а выделение аллелотоксинов, которые

начинают ограничивать продуктивность агроценозов, снижающих качество почв [9], является защитной реакцией экосистем.

Механизмы противодействия экосистем основаны на том, что, во-первых, при монокультуре меняется состав микроорганизмов почв с увеличением доли фитопатогенов. Во-вторых, возделывание практически любой монокультуры из-за высокой плотности расположения приводит к борьбе растений за ресурсы путем выделения в почвы аллелотоксинов самими растениями, что отмечается во многих исследованиях по аллелопатии [3, 9]. Сходное явление в естественных экосистемах наблюдается при флуктуационных изменениях (хорошо изученных в луговых фитоценозах), когда доминирование одних культур на следующий год сменяется доминированием других [4]. По-видимому, наряду с климатическими факторами, используемыми для объяснения флуктуаций, в их основе лежит и накопление аллелотоксинов.

Проведенное изучение аллелотоксичности различных почвенных горизонтов (табл. 2, образцы 5 и 6) подтвердило ранее известные данные о том, что аллелотоксичность почв возрастает с глубиной [3, 8, 10]. Это объясняют переносом аллелотоксинов в нижележащие горизонты с почвенной влагой [3], а также тем, что в почвах с глубиной снижается численность микроорганизмов, которые используют аллелотоксины в качестве источников углерода [3, 18–21, 23, 25], уменьшая их концентрацию. Снижение концентрации микроорганизмов приводит к накоплению аллелотоксинов привносимых из верхних слоев почв. Отмечают, что с глубиной в почвах нарастает численность фитотоксичных форм бактерий и грибов [7].

Математическая обработка данных по ингибированию и химическим свойствам почв показала, что линейная связь между ними для яровой пшеницы разных сортов — достаточно слабая (табл. 5). Коэффициенты корреляции по абсолютной величине, превышающие значение 0.5, только у соединений фосфора и калия на некоторых сортах пшеницы.

График линейной регрессии ингибирования для сорта яровой пшеницы “Эстер” имеет зависимость с коэффициентом детерминации  $R^2 > 0.5$ .

**Таблица 5.** Коэффициенты корреляции между ингибированием яровой пшеницы разных сортов и химическими свойствами почв

Сорт	pH <sub>KCl</sub>	Ca	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	S	C
“Лиза”	-0.323	-0.190	-0.430	-0.395	0.184	0.164	0.193
“Агата”	-0.164	-0.096	-0.394	-0.306	0.226	0.223	0.244
“Любава”	-0.326	-0.335	<b>-0.564</b>	<b>-0.592</b>	0.264	0.286	0.339
“Злата”	-0.166	-0.130	<b>-0.514</b>	-0.425	0.261	0.288	0.315
“РИМА”	-0.342	-0.249	<b>-0.599</b>	<b>-0.525</b>	0.354	0.391	0.437
“Эстер”	-0.423	-0.271	<b>-0.651</b>	<b>-0.555</b>	0.409	0.449	0.493

Примечание. Уровень значимости коэффициента корреляции вычисляется при помощи таблицы критических значений Пирсона. Выбираем строку:  $K = n - 2 = 10$  при  $p = 0.5$  должно быть 0.58 при  $p = 0.01$  должно быть 0.71. В нашем случае почти все коэффициенты корреляции не превышают по абсолютной величине 0.58. Следовательно, достоверность различий не установлена. За исключением связи “Эстер” и “РИМА” с P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и “Любавы” с K<sub>2</sub>O. Здесь эмпирическое значение занимает промежуточное положение между столбцами  $p = 0.05$  и  $p = 0.01$  в таблице Пирсона, следовательно,  $0.05 \geq p \geq 0.01$ . Таким образом, эти значения значимы на уровне  $p < 0.05$  (это уровень статистической значимости).

Обычно чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель (хорошо  $> 0.8$ ). В нашем случае связь имеет  $R^2 = 0.42$  для P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и  $R^2 = 0.31$  для K<sub>2</sub>O. Коэффициенты корреляции для них  $r = -0.651$  и  $-0.555$  соответственно.

Выдвинуто предположение, что на ингибирование яровой пшеницы может влиять совокупность факторов. Поэтому был проведен множественный регрессионный анализ. Хорошая связь получилась с такими химическими свойствами, как pH, концентрации подвижного кальция, фосфора и азота. Множественный коэффициент корреляции 0.901,  $R^2 = 0.811$ .

Значение множественного коэффициента детерминации  $R^2 = 0.811$  показывает, что 81.1% общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных признаков  $X_1, X_2, X_3, X_4$ , а на 18.9% другими неучтенными факторами. Значит, выбранные факторы существенно влияют на ингибирование, что подтверждает правильность их включения в построенную модель. Рассчитанный уровень значимости ( $0.0112 < 0.05$ ) подтверждает значимость  $R^2$ .

Таким образом, проведенная статистическая обработка данных свидетельствует о влиянии на ингибирование химических свойств почв. Однако на данном этапе исследования мы не можем ничего сказать о природе этого влияния. Химические свойства почв могут воздействовать на накопление аллелотоксинов в почвах. Однако нельзя исключать их влияния на доступность аллелотоксинов растениям — на прочность связи аллелотоксинов в почвах.

## ВЫВОДЫ

1. Прослеживается однотипность изменения ингибирования яровой пшеницы разных сортов и других зерновых культур почвами. Для яровой

пшеницы это подтверждается и тесной корреляцией между сортами. Коэффициенты корреляции близки к единице. Также можно отметить, что более всех подвержены ингибированию сорта пшеницы “Злата”, “РИМА”, “Любава” и “Эстер”, которые коррелируют друг с другом. Сорт “Лиза” более устойчив к аллелотоксинам, а сорт “Агата” занимает промежуточное положение.

2. Аллелотоксическое воздействие окультуренных почв на прорастание семян и развитие проростков яровой пшеницы выражено значительно сильнее по сравнению с почвами, не используемыми для возделывания культурных растений.

3. Полученные данные свидетельствуют, что применение севооборотов не всегда способно снизить почвоутомление. Это делает необходимым проведение оценки аллелотоксичности почв при применении севооборотов.

4. Проведенная статистическая обработка данных свидетельствует о влиянии совокупности химических свойств почв на ингибирование прорастания семян и развития их проростков. Однако на данном этапе исследования мы не можем сказать о природе этого влияния.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берестецкий О.А. Фитотоксины почвенных микроорганизмов и их экологическая роль // Фитотоксические свойства почвенных микроорганизмов. Л.: ВНИИСХМ, 1978. С. 7–30.
2. Вольнец А.П. Фенольные соединения в жизнедеятельности растений. Минск: Беларус. навука, 2013. 283 с.

3. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головки Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
4. Ипатов В.С., Кирикова Л.А. Фитоценология. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1997. 316 с.
5. Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
6. Коношина С.Н. Влияние аллелопатической активности почвы на качество урожая озимой пшеницы в условиях орловской области // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. № 6. С. 184–187.
7. Коношина С.Н. Влияние различных агрофитоценозов на распространение фитотоксичных микроорганизмов в почве // European Sci. Rev. 2014. № 5–6. С. 110–112.
8. Коношина С.Н. Влияние различных способов использования почвы на ее аллелопатическую активность. Дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, 2000. 145 с.
9. Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии: монография. Орел, 2017. 166 с.
10. Лобков В.Т. Почвоутомление при выращивании полевых культур. М.: Колос, 1994. 112 с.
11. Обручева Н.В., Антипова О.В. Физиология инициации прорастания семян // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 2. С. 287–302.
12. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 304 с.
13. Руссель С. Микроорганизмы и жизнь почвы. М.: Колос, 1977. 226 с.
14. Сечняк Л.К., Киндрок Н.А., Слюсаренко О.К., Иващенко В.Г., Кузнецов Е.Д. Экология семян пшеницы. М.: Колос, 1983. 349 с.
15. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
16. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Горепекин И.В. Методика для оценки эффективности действия стимуляторов прорастания семян // Лесной вестник. 2018. № 6. С. 95–101.
17. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф., Горепекин И.В. Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // Почвоведение. 2019. № 4. С. 489–496. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040051>
18. Allelopathy. A physiological process with ecological implications / Ed. Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. Springer, 2006. 637 p.
19. Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy // Frontiers in Plant Science. 2015. V. 6. Article 1020.
20. Ghulam J., Shaukat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil – a review // Annals of Microbiology. 2008. 58. P. 351–357.
21. Li Y.P., Feng Y.L., Chen Y.J., Tian Y.H. Soil microbes alleviate allelopathy of invasive plants // Sci. Bull. 2015. V. 60. № 12. P. 1083–1091.
22. McCalla T.M., Haskins F.A. phytotoxic substances from soil microorganisms and crop residues // Bacteriological Rev. 1964. V. 28. P. 181–207.
23. Norouzi Y., Mohammadi G.R., Nosratti I. Soil factors affecting the allelopathic activities of some plant species // J. Appl. Environ. Biol. Sci. 2015. V. 5. P. 285–290.
24. Rice E.L. Allelopathy. N.Y.: Academic Press, 1984. 422 p.
25. Šerá B. et al. New physicochemical treatment method of poppy seeds for agriculture and food industries // Plasma Sci. Technol. 2013. V. 15. № 9. P. 935.

## Relationship of Land Use History and Chemical Properties of Soils with Their Allelotoxicity

G. N. Fedotov<sup>1,\*</sup>, I. V. Gorepekin<sup>1</sup>, A. D. Pozdnyakova<sup>2</sup>, Yu. A. Zavgorodnyaya<sup>1</sup>, and S. A. Isakova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>2</sup>All-Russia Research Institute of Reclaimed Lands, Emmauss, 170530 Russia

\*e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

The influence of land use history and chemical properties of soils on their allelotoxicity was examined. Twelve soil samples obtained on the Russian Plain and seeds of six cultivars of spring wheat, as well as seeds of barley, rye, and triticale were used in the study. It was found that different grain crops are inhibited by toxic substances contained in the soils in same manner. The allelotoxicity of the soils differed in dependence on the previous land use and was much higher in the soils from agricultural fields, irrespectively of the grown crops, than in the soils of long-term fallow plots and forests. These data allow us to suppose that crop rotation systems are not always sufficient to reduce soil fatigue. In this context, the assessment of the real soil fatigue (soil allelotoxicity) in the course of crop rotation is necessary. Statistical processing of available data attest to the influence of the chemical properties of soils on the inhibition of seed germination and the development of seedlings. However, the nature of this influence remains uncertain.

**Keywords:** allelopathy, soil allelotoxicity, deceleration of the development of seedlings, land use history, crop rotation, soil chemical properties, soil allelotoxicity