

УДК 631.4; 633.1

АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ И ВОДОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПОСЛЕ ВЫРАЩИВАНИЯ НА НЕЙ ПШЕНИЦЫ

© 2022 г. Академик РАН Б. И. Сандухадзе², Г. Н. Федотов¹, Н. В. Давыдова², Р. З. Мамедов², Д. А. Ушкова¹, В. А. Нардид², И. В. Горепекин¹, М. С. Крахмалева², Д. И. Потапов¹, А. О. Казаченко², В. В. Бугрова², Т. А. Грачева^{1,*}

Поступило 12.05.2022 г.
После доработки 13.07.2022 г.
Принято к публикации 15.07.2022 г.

Известно, что аллелотоксичность почв и водоустойчивость почвенной структуры определяются поступлением в почву растительных остатков, но взаимосвязь этих почвенных свойств не была исследована. В работе проведен отбор почвенных образцов после выращивания на делянках на дерново-подзолистой почве в полях ФИЦ “Немчиновка” 25 сортов яровых и озимых пшениц. Методом биотестирования было изучено аллеловоздействие почвенных образцов, отобранных с делянок, на развитие семян яровой пшеницы сорта Лиза. Для этих же почвенных образцов была определена водоустойчивость почвенной структуры. Установлено существование сигмоидной зависимости между аллеловоздействием образцов и их водоустойчивостью с корреляцией больше 95%. Наличие такой зависимости, по-видимому, обусловлено известным из литературы повышением водоустойчивости почв при увеличении количества попадающих в них свежих растительных остатков и переходом воздействия аллелотоксинов от стимуляции к угнетению с ростом их концентрации в почвах.

Ключевые слова: яровая и озимая пшеницы, водоустойчивость почв, растительные остатки, аллеловоздействие почв, развитие семян в почвах, влияние аллелотоксинов на растения

DOI: 10.31857/S2686738922060270

Существование аллелопатического почвоутомления (аллелотоксичности почв) и его негативное влияние на развитие растений известно давно [1]. Оно обусловлено высокой сорбционной способностью почв и закреплением в них аллелотоксинов [1–3].

Известны различные механизмы поступления этих веществ в почву. Они выделяются растениями для борьбы с конкурентами (1), а также в качестве сигнальных веществ для предупреждения других растений об экологической опасности или для торможения своих биохимических процессов (2), чтобы возникшие негативные экологические факторы нанесли сообществу растений минимальный урон [1–3].

Установлено, что действие любых абиотических стресс-факторов (3) в процессе вегетации приводит к усилению выработки растениями аллелотоксинов, выделению их и повышению аллелотоксичности почв [4]. Эти вещества вырабаты-

ваются микроорганизмами при борьбе с конкурентами за ресурсы и в качестве побочных продуктов метаболизма (4). Кроме того, в литературе описано выделение аллелотоксинов из растительных остатков (5) при их разложении в почвах [1].

Также известно, что водоустойчивость почвенной структуры зависит от количества поступающих в нее свежих растительных остатков [5–7]. Однако взаимосвязь между водоустойчивостью почвенной структуры и аллелотоксичностью устанавливать до настоящего времени не пытались, хотя они могут определяться одним фактором – поступлением в почвы свежих растительных остатков.

Целью работы была проверка существования взаимосвязи между аллелотоксичностью почв и водоустойчивостью почвенной структуры.

В работе исследовали образцы почв, отобранные после уборки сортов яровой пшеницы, участвующих в полевых сортоиспытаниях на базе ФИЦ “Немчиновка” в 2021 г.

В работе использовали яровые пшеницы сортов РИМА, Эстер, Лиза, Московская-35, Лада, Приокская, Агрос, Л459/3-15, Л460/2-15 и сорта и линии озимой пшеницы Московская 39, Московская 56, Мироновская 808, Эритроспермум 128/13,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”, Немчиновка, Московская область, Россия

*e-mail: tanyadunaeva12@mail.ru

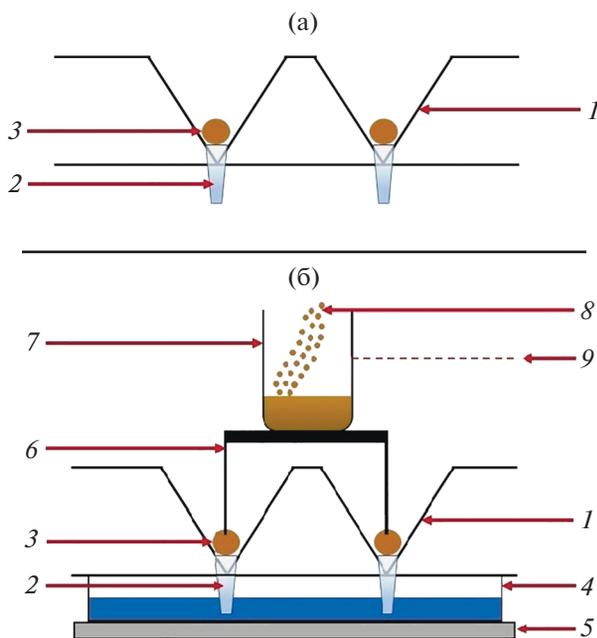


Рис. 1. (а) Схема кассеты для определения водоустойчивости почвенных агрегатов. Цифрами обозначены: 1 – алюминиевые уголки, соединенные между собой; 2 – хлопчатобумажные фитили; 3 – почвенные агрегаты. (б) Общая схема установки для определения водоустойчивости почвенных агрегатов: цифрами обозначены: 1 – алюминиевые уголки, соединенные между собой; 2 – хлопчатобумажные фитили; 3 – почвенные агрегаты; 4 – емкость с водой; 5 – весы; 6 – площадка с закрепленными на ней лезвиями; 7 – мерный стаканчик с песком; 8 – добавляемый в мерный стаканчик песок; 9 – луч лазера, направленный на мерную шкалу стаканчика.

Эритроспермум 416/20, Московская 40, Немчиновская 85, Эритроспермум 185/16, Лютесценс 214/17, Немчиновская 24, Немчиновская 17, Эритроспермум 130/19, Эритроспермум 118/20, Эритроспермум 361/20, Лютесценс 362/20, Лютесценс 982/08, которые выращивали на дерново-подзолистой почве в полях ФИЦ “Немчиновка” на делянках, на которые вносили разные дозы азотных удобрений. После уборки урожая с делянок, на которых выращивали пшеницу, были отобраны образцы почвы для определения их водоустойчивости и аллелотоксичности.

Процесс определения водоустойчивости состоял из двух этапов: подготовки образцов и проведения измерения.

При подготовке образцов почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сита, отбирая агрегаты диаметром 4.5–5 мм.

В ходе измерения воздушно-сухие агрегаты помещали в кассету, представляющую собой 2 алюминиевых уголка, закрепленных таким образом, чтобы угол был ориентирован по направлению действия силы тяжести (рис. 1 а, 1). В ниж-

ней части уголка были размещены фитили из хлопчатобумажной ткани (рис 1 а, 2). В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов¹ так, чтобы они касались друг друга. Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 мин при разрежении 15 кПа. Условия были подобраны в ходе изучения водоустойчивости воздушно-сухих агрегатов в предварительных экспериментах. После этого агрегаты в вакууме через фитили капиллярно увлажняли до значений, близких к насыщению.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом (рис. 1 б, 4, 5), чтобы фитили агрегатов обеспечивали сохранение насыщения агрегатов водой, достигнутое на этапе вакуумирования. Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия, закрепленные на площадке (рис. 1 б, 6), на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой (рис. 1 б, 7). Использование двух лезвий обеспечивало устойчивость устройства при воздействии на агрегаты, а также увеличивало количество агрегатов, которые одновременно рассекали лезвия. Добавляя песок в стаканчик (рис. 1 б, 8), повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали при помощи весов. Луч лазера (рис. 1 б, 9), закрепленный на другом штативе, направленный на мерную шкалу стаканчика, позволял хорошо контролировать процесс разрушения агрегатов.

С целью стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиньютонах (мН). Для получения удельной характеристики нагрузку делили на общее количество агрегатов в повторности – 28 штук.

Эксперименты проводили в шестикратной повторности с последующей статистической обработкой результатов с использованием программного обеспечения OriginPro, в котором рассчитывали доверительный интервал, который не превышал 10% при 95% уровне значимости.

Для определения аллеловоздействия почв на развитие семян проводили сравнительные испытания по развитию проростков семян яровой пшеницы сорт Лиза в песке и почвах. При проведении этих экспериментов принимали за 100% развитие семян в песке и рассчитывали относительно полученного значения замедление или ускорение развития проростков семян почвой [1].

¹ Количество агрегатов, укладываемых в уголки, лимитировалось размерами емкости, в которой проводили их вакуумирование.

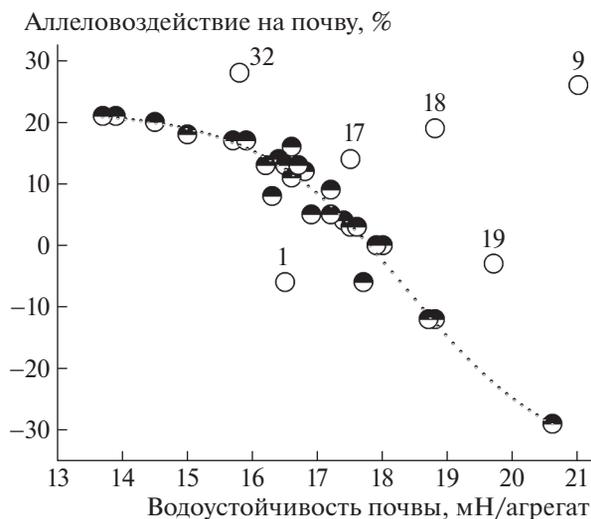


Рис. 2. Взаимосвязь между аллеловоздействием и водоустойчивостью почвенных образцов после выращивания на почве озимой и яровой пшеницы разных сортов. Номера образцов почв на графике соответствуют данным, представленным в таблицах.

Изучали изменение интегральной длины проростков 7.5 г семян (~200 шт.), которую определяли, используя экспресс-метод биотестирования, основанный на существовании линейной зависимости между насыпным объемом семян с проростками в воде и длиной их проростков [8].

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 воду из мерной пипетки.

Семена, проросшие в песке/почве, отмывали от субстрата и помещали порциями в мерный цилиндр на 100 мл с водой, размещенный на вибростол, колеблющемся с частотой 50 Гц. После помещения каждой порции проросших семян в цилиндре на них помещали (сроком на 15–20 с) небольшой резиновый грузик массой 8 г, что приводило к уплотнению структуры. После проводили дополнительное уплотнение структуры легкими постукиваниями (30–40 раз) цилиндра о стол. Эти операции позволяли создать однородную структуру, а нижняя граница груза позволяла определять насыпной объем с точностью до 0.5 мл.

Эксперименты проводили в шестикратной повторности с последующей статистической обработкой результатов с использованием программного обеспечения OriginPro, в котором рассчитывали доверительный интервал, который не превышал 15% при 95% уровне значимости.

Полученные данные по водоустойчивости и аллеловоздействию образцов почв после выращивания озимой и яровой пшеницы разных сортов приведены в табл. 1 и 2.

Из построенного в координатах “аллеловоздействие – водоустойчивость почв” графика (рис. 2) хорошо видно, что образцы почвы после выращивания трех сортов пшеницы (Московская 39, Лютеценс 214/17 и Агрос) выпадают из общей картины. На графике 6 точек выпадают из общей картины (один из сортов выращивали при 4 дозах внесения азота).

Свойства образцов почв после выращивания 22 сортов пшеницы располагаются на графике так, что аппроксимируются с очень высокой корреляцией (более 95%) сигмоидной зависимостью.

Из полученных данных хорошо видно, что длина стебля пшеницы, доза вносимых в почву азотных удобрений и урожайность не оказывают значимого влияния на изучаемые свойства, так как обнаруженная закономерность не нарушается при изменении этих параметров.

Можно предположить, что увеличение количества растительных остатков, которые попадают в почву [5–7] преимущественно в виде корневого опада, сопровождается ростом водоустойчивости.

На основе полученной зависимости можно сделать вывод, что увеличение количества попадающих в почву растительных остатков приводит сначала к снижению стимулирующего воздействия, а затем – к проявлению и росту аллелотоксичности почв. Это хорошо объясняется с позиций известных из литературы данных по изучению аллелотоксичности.

В них показано, что при малых концентрациях аллелотоксины оказывают на растения стимулирующее, а не угнетающее влияние, а их негативный эффект начинает проявляться при более высокой концентрации [9, 10].

Таблица 1. Водоустойчивость и аллеловоздействие образцов дерново-подзолистых почв на прорастание семян яровой пшеницы сорт “Лиза” и начальную стадию развития из них растений после выращивания различных сортов озимой пшеницы, удобряемых различными дозами азота

№	Сорт	Длина стебля	Доза азота, кг/га	Аллеловоздействие, %	Водоустойчивость, мН/агрегат
1	Московская 39	длинный	120	-6 ± 2	16.5 ± 0.52
2	Московская 56	длинный	120	+4 ± 2	17.4 ± 0.60
3	Мироновская 808	длинный	120	0 ± 2	18.0 ± 0.56
4	Эритроспермум 128/13	длинный	120	+18 ± 3	15.0 ± 0.76
5	Эритроспермум 416/20	длинный	120	+20 ± 3	14.5 ± 0.92
6	Московская 40	средний	120	+17 ± 3	15.7 ± 0.65
7	Немчиновская 85	средний	120	+12 ± 2	16.8 ± 0.84
8	Эритроспермум 185/16	средний	120	+4 ± 2	17.4 ± 0.54
9	Лютесценс 214/17	средний	120	+26 ± 3	21.0 ± 1.06
10	Немчиновская 24	средний	120	+3 ± 2	17.5 ± 0.74
11	Немчиновская 17	средний	120	+3 ± 2	17.6 ± 0.54
12	Эритроспермум 130/19	короткий	120	+16 ± 3	16.6 ± 0.95
13	Эритроспермум 118/20	короткий	120	+21 ± 3	13.9 ± 0.50
14	Эритроспермум 361/20	короткий	120	+21 ± 3	13.7 ± 0.36
15	Лютесценс 362/20	короткий	120	+14 ± 3	16.4 ± 0.30
16	Лютесценс 982/08	короткий	120	0 ± 2	17.9 ± 1.02
17	Московская 39	длинный	0	+14 ± 3	17.5 ± 0.52
18	Московская 39	длинный	60	+19 ± 3	18.8 ± 1.30
19	Московская 39	длинный	180	-3 ± 2	19.7 ± 0.38
20	Немчиновская 85	средний	0	-6 ± 3	17.7 ± 0.56
21	Немчиновская 85	средний	60	-12 ± 3	18.8 ± 0.38
22	Немчиновская 85	средний	180	5 ± 2	17.2 ± 0.43
23	Лютесценс 982/08	короткий	0	-29 ± 4	20.6 ± 0.59
24	Лютесценс 982/08	короткий	60	-12 ± 3	18.7 ± 0.95
25	Лютесценс 982/08	короткий	180	+9 ± 3	17.2 ± 0.81

Таблица 2. Водоустойчивость и аллеловоздействие образцов дерново-подзолистых почв на прорастание семян яровой пшеницы сорт “Лиза” и начальную стадию развития из них растений после выращивания различных сортов яровой пшеницы, удобренных дозой азота 120 кг/га

№	Сорт	Урожайность, т/га	Аллеловоздействие, %	Водоустойчивость, мН/агрегат
26	РИМА	3.36 ± 0.62	5 ± 2	16.9 ± 0.43
27	Эстер	3.27 ± 0.33	13 ± 2	16.5 ± 0.46
28	Лиза	2.80 ± 0.28	11 ± 2	16.6 ± 0.28
29	Московская-35	3.62 ± 0.25	17 ± 3	15.9 ± 0.38
30	Лада	3.68 ± 0.29	13 ± 2	16.2 ± 0.44
31	Приокская	3.69 ± 0.22	9 ± 2	17.2 ± 0.52
32	Агрос	4.35 ± 0.34	28 ± 3	15.8 ± 1.28
33	Л459/3-15	4.58 ± 0.37	8 ± 2	16.3 ± 0.89
34	Л460/2-15	4.47 ± 0.24	13 ± 2	16.7 ± 0.85

На основе всей представленной выше информации дается достаточно простое объяснение полученной сигмоидной зависимости – увеличение количества растительных остатков, попадающих в почву, приводит к увеличению поступления в почву аллелотоксинов, которые при росте их содержания в почве изменяют эффект воздействия от стимуляции к угнетению. При этом из данного объяснения вытекает ряд следствий, без которых трудно представить возникновение наблюдающейся зависимости:

1. Аллелотоксины в условиях выращивания пшениц в 2021 г. попадали в почву преимущественно при перегнивании корневых растительных остатков. Все остальные описанные выше механизмы (1–4) не могут оказывать на поступление аллелотоксинов в почву при проведении данных экспериментов значимого влияния, так как в противном случае не удалось бы получить обнаруженной зависимости.

2. Растительные остатки озимой пшеницы, попавшие в почву перед зимой, к лету уже перегнивают и не оказывают значимого влияния на водостойчивость и на аллеловоздействие почв. Иначе данные по свойствам почв после озимых пшениц не легли на одну кривую с данными после яровых пшениц.

3. Количество отмирающих корней не зависит от наземной массы растений. Об этом свидетельствует отсутствие влияния на аллелотоксичность и водостойчивость почвенных образцов урожайности и длины стебля растений.

4. Количество аллелотоксинов в растительных остатках разных сортов пшеницы и их состав значимо не меняются от сорта к сорту, а также под влиянием внесения азотных удобрений. В противном случае следовало бы ожидать большего разброса точек.

Причина того, что сорта Московская 39, Лютеценс 214/17 и Агрос при выращивании влияют на почву иначе, по-видимому, связана с тем, что либо доминирует другой механизм поступления в почву аллелотоксинов, либо для этих сортов характерны другие составы аллелотоксинов, образующихся в почве при перегнивании корневого опада.

ВЫВОДЫ

1. При изучении аллеловоздействия на почву и ее водостойчивость при выращивании на почве яровой и озимой пшениц разных сортов обнаружено существование сигмоидной зависимости этих свойств друг от друга для 22 из 25 исследованных сортов.

2. На основании литературных данных выдвинуто предположение, что существование этой зависимости определяется повышением водо-

устойчивости почв при увеличении количества попадающих в них свежих растительных остатков и переходом аллеловоздействия аллелотоксинов от стимуляции к угнетению с ростом их концентрации в почве.

3. Причина отличающегося поведения трех сортов пшеницы Московская 39, Лютеценс 214/17 и “Агрос” от других сортов пшеницы в настоящий момент не вполне понятна.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-14-00107 Методологические основы оценки продукционного потенциала почв на федеральном, региональном и локальном уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головкин Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наук. думка, 1979. 248 с.
2. Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / Eds. Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. Springer, 2006. 637 p.
3. Rice E.L. Allelopathy. New York: Academic Press, 1984. 422 p.
4. 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.
5. Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б. Содержание и состав гумусовых веществ в водопроходных агрегатах темно-серой лесной почвы // *Почвоведение*, 1997. № 2. С. 165–172.
6. Козуп Б.М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // *Почвоведение*, 2003. № 3. С. 308–316.
7. Овчинникова М.Ф. Деградация гумуса (особенности проявления в разных экоусловиях). М. 2012. 236 с.
8. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф., Горепенин И.В. Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // *Почвоведение*. 2019. № 4. С. 489–496.
9. Ghulam J., Shaukat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil – a review // *Annals of Microbiology*, 58 (3), 351–357 (2008).
10. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Избранные труды. Киев, Наукова думка. 1991. 432 с.

ALLELOTOXICITY AND WATER STABILITY OF SOD-PODZOLIC SOIL AFTER WHEAT GROWING

Academician of the RAS **B. I. Sandukhadze^b, G. N. Fedotov^a, N. V. Davydova^b, R. Z. Mamedov^b, D. A. Ushkova^a, V. A. Nardid^b, I. V. Gorepekin^a, M. S. Krakhmaleva^b, D. I. Potapov^a, A. O. Kazachenko^b, V. V. Bugrova^b, and T. A. Gracheva^{a,#}**

^a *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^b *Federal Research Center "Nemchinovka", Nemchinovka, Moscow region, Russian Federation*

[#] *e-mail: tanyadunaeva12@mail.ru*

It is known that soil allelotoxicity and the water stability of soil structure are determined by the entry of plant residues into the soil, but the relationship of these soil properties has not been investigated. The selection of soil samples from the fields of the Federal Research Center "Nemchinovka" after growing on plots with sod-podzolic soil 25 cultivars of spring and winter wheat was carried out in the work. Effect of soil allelotoxicity of plot samples on germination of spring wheat seed of Liza cultivar was studied by biotesting method. The water stability of soil structure was determined for the same samples. The existence of a sigmoid dependence between the allelotoxicity of soil samples and their water stability with a correlation greater than 95% has been established. The presence of such dependence is apparently related to the increase in soil water stability known from the literature with an increase in the amount of fresh plant residues entering them and the transition of the allelotoxins effects from stimulation to suppression with an increase in their concentration in soils.

Keywords: spring and winter wheat, water stability of soil, plant residues, alleloeffect of soils, seed development in soils, the effect of allelotoxins on plants