

АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ, МЕХАНИЗМЫ ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ

Г.Н. Федотов^{1, 2}, В.С. Шалаев², Ю.П. Батырев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Факультет почвоведения, МГУ

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Рассмотрено явление аллелотоксичности почв и его негативное влияние на развитие растений. Показано, что исследование химического состава почв не позволяет однозначно определять наличие аллелотоксичности у почв и ее величину. Поэтому для изучения аллелотоксичности почв необходимо использовать методы биотестирования. Установлено, что использование для борьбы с аллелотоксичностью почв только севооборотов не позволяет полностью решить проблему почвоутомления. Сделан вывод о том, что для снижения аллелотоксичности почв необходимо разработать методы, в основе которых может лежать снижение концентрации аллелотоксинов в почвах путем активации развития микроорганизмов, способных использовать аллелотоксины в качестве источников углерода, или закрепление аллелотоксинов (снижение их активности) в гумусовой матрице почвенных гелей.

Ключевые слова: аллелотоксичность почв, ингибирование почвами развития проростков семян, снижение аллелотоксичности, микроорганизмы, гумусовая матрица почвенных гелей и закрепление в ней аллелотоксинов

Ссылка для цитирования: Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Аллелотоксичность почв, механизмы ее возникновения и возможные пути снижения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 37–42. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-37-42

Негативное влияние почв на развитие растений известно давно [1–3]. Обусловлено оно накоплением в почвах аллелотоксинов [2, 4–8] вследствие их высокой сорбционной способности. Известны различные пути поступления в почву аллелотоксинов. Отметим, что растения используют химические вещества для борьбы со стрессовыми воздействиями и конкурентами [1, 9–11]. В процессе эволюции растения стали самостоятельно вырабатывать универсальные вещества, предназначенные для преодоления негативных воздействий. Их проявление во время вегетации обуславливает усиление выработки растениями аллелотоксинов, выделение их, а следовательно, повышение аллелотоксичности почв [8, 12, 13]. Аллелотоксины также вырабатывают микроорганизмы, разлагающие растительные остатки [2, 3, 11, 14, 15], кроме того, они выделяются из растительных остатков при их разложении в почвах [1, 7, 16], выделяются фитопатогенами [16], а к их появлению в почвах приводят и воздействия, изменяющие микробиологический состав почв [6, 17]. Аллелотоксичность почв усиливается при избыточном использовании минеральных удобрений [14, 15].

Перечисленные явления широко распространены. В ходе исследования нескольких тысяч образцов подзолистых почв установлено, что практически все они аллелотоксичны [2].

Природа аллелотоксинов весьма разнообразна. Среди них были обнаружены следующие: простые водорастворимые органические кислоты; спирты с неразветвленной цепью; алифатические

альдегиды и кетоны; простые ненасыщенные лактоны; жирные кислоты с длинной цепью; нафтохиноны, антрахиноны и сложные хиноны; терпеноиды и стероиды; простые фенолы; бензойная кислота и ее производные; коричная кислота и ее производные; кумарины; флавоноиды; танины; аминокислоты и полипептиды; алколоиды и циангидрины; сульфиды и гликозиды горчичного масла; пурины и нуклеозиды — 14 групп химических соединений [18].

Исследование химического состава почв не позволяет однозначно определять наличие аллелотоксичности у почв и ее величину. Во-первых, как показано выше, соединений, которые могут ингибировать развитие растений достаточно много, что делает количественный анализ содержания этих веществ в почвах трудновыполнимой задачей. Во-вторых, токсины закреплены в почвах (прежде всего, в органическом веществе почв) связями с сильно отличающейся энергией [1]. В результате практически невозможно определить, какая часть молекул, находящихся в почве аллелотоксинов, будет оказывать негативное влияние на растения, а к каким из них растения будут нечувствительны. В-третьих, аллелотоксины во многих случаях представляют собой смесь различных веществ, причем концентрация каждого из компонентов смеси может быть ниже порога ингибирования (обнаруживаемые в почвах концентрации индивидуальных аллелотоксинов, как правило, ниже порога ингибирования [6]), а суммарное угнетение может быть очень сильным [11]. В-четвертых, некоторые из веществ сами

по себе не являются токсичными (сахара), но значительно усиливают действие токсинов [7]. В связи с перечисленными проблемами получения значимой информации методами химического анализа основными способами изучения аллелотоксичности почв являются методы биотестирования [1, 5, 6, 9–11].

Эффекты ингибирования аллелотоксинами особенно сильно влияют на прорастание семян и развитие из них растений [4, 7], поэтому аллелотоксичность почв, как правило, изучали, ориентируясь на прорастание семян. Наиболее распространено изучение влияния вытяжек из почв на развитие семян [1, 5, 11], но существуют методы оценки аллелотоксичности почв с помощью набора тест-культур [19].

Первая группа методов фактически позволяет на качественном уровне получить ответ на вопрос о наличии аллелотоксичности. Однако переход аллелотоксинов из почвы в вытяжку с последующим воздействием вытяжки на семена может не соответствовать воздействию аллелотоксинов на семена, прорастающие в почвах, содержащих эти токсины.

Метод тест-культур тоже имеет свои ограничения вследствие того, что растения обладают разной толерантностью к аллелотоксинам [9, 10] и, установив степень аллелотоксичности почв на тестовых объектах, невозможно предсказать поведение конкретных культур на этих почвах.

Эти недостатки были преодолены в методике [20], позволяющей определять ингибирование прорастания и развития семян в изучаемых почвах по сравнению с инертным субстратом — песком при влажностях, обеспечивающих оптимальные водно-воздушные условия песка и почв, по суммарной длине проростков больших массивов семян (1000...1200 шт.).

В настоящее время можно выделить следующие основные направления исследований по аллелопатии в мировой науке: изучение аллелопатического влияния одних растений на другие [9, 10, 21–23]; изучение состава выделяемых аллелотоксинов [7, 8, 12, 13]; поиск аллелотоксинов для применения их в качестве гербицидов [24, 25]; использование аллелопатии в сельском хозяйстве [12, 26, 27].

За последние годы внимание к аллелопатии существенно возросло, поскольку она во многом определяет возможность получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Считают, что до 25 % урожаев теряется в результате аллелотоксичности почв [5].

Однако очень трудно доказать, что накопление в почвах аллелотоксинов является непосредственной причиной почвоутомления [1]. Связано это с тем, что негативное влияние аллелотоксинов на

растения происходит очень постепенно и на начальном этапе его трудно заметить. Ослабленные растения теряют стойкость к холоду или засухе, в них резко снижается иммунитет к фитопатогенам и вредителям, а также уменьшается конкурентоспособность по отношению к сорнякам. В этих условиях болезни, вредители, сорняки начинают активно развиваться. Они хорошо заметны, поэтому именно их принимают за истинную причину почвоутомления, тогда как они являются лишь реакцией экосистемы на наличие почвенной аллелотоксичности. Подавление болезней и вредителей, борьба с сорняками часто не дают нужных результатов, так как не устраняется причина — наличие в почве аллелотоксинов [1].

Неоднократно предпринимались попытки снижения аллелотоксичности почв с помощью их промывания большим количеством воды [2] или органических растворителей [3], промораживания, автоклавирования и известкования [2], а также почвы прогревали и вносили в них навоз [1].

Некоторые исследователи, работающие в области изучения аллелопатии почв, пришли к выводу, что аллелотоксичность почв способны снижать микроорганизмы, которые используют аллелотоксины в качестве источников углерода для своего питания [1, 11–13, 18, 28, 29]. Однако понять механизм снижения аллелотоксичности и получить воспроизводимые результаты по ее снижению даже в лабораторных экспериментах до настоящего времени не удалось. В одних случаях используемые приемы давали положительный эффект, а в других — нет.

Объекты и методы исследований

Таким образом, в аллелопатии накоплен большой объем важной и разнообразной информации, но решающий шаг к пониманию механизма ее снижения и созданию на этой основе методов, которые реально можно использовать в сельскохозяйственном производстве, до сих пор не сделан. Единственное предложение по результатам исследований, не вызывающее сомнений, состоит в необходимости применения севооборотов [5, 6], которые уменьшают поступление аллелотоксинов в почву, снижая тем самым ее аллелотоксичность. Тем не менее такой подход применим только к выращиванию полевых культур. Возможность его использования в садоводстве, овощеводстве, цветоводстве, защищенном грунте сомнительна. Применение севооборотов не позволяет также активно влиять на состояние почв, обеспечивая их восстановление (снижение аллелотоксичности) быстрыми темпами, в которых часто нуждаются различные отрасли сельского хозяйства.

Для решения этой проблемы, на наш взгляд, надо исходить из того, что аллелотоксичность

почв определяется двумя независимыми факторами — концентрацией аллелотоксинов в почвах и прочностью их связей. Выше перечислены механизмы накопления аллелотоксинов в почвах, но при одной и той же концентрации аллелотоксинов ингибирующая способность почв может значительно отличаться. Как следствие, появляется необходимость отдельно рассматривать два направления снижения аллелотоксичности почв: путем снижения концентрации в почвах аллелотоксинов и снижения активности аллелотоксинов, содержащихся в почвах.

Удаление аллелотоксинов из почв в естественных условиях может происходить в результате стока с водой при промывном режиме или взаимодействия и преобразования при химических реакциях, а также при использовании микроорганизмами почв аллелотоксинов в качестве источников углерода. Применение первых двух подходов для освобождения почв от аллелотоксинов не гарантирует положительный результат. Поэтому имеет смысл основное внимание обратить на разработку методов, основанных на использовании микроорганизмами почв аллелотоксинов в качестве источников углерода.

Подобные методы должны быть основаны на увеличении соотношения: почвенные микроорганизмы / содержание в почвах источников углерода. Следовательно, введение в почву источников углеродного питания для микроорганизмов не может дать положительного результата, поскольку величина соотношения при этом будет не возрастать, а снижаться. Остается два пути: введение в почву навоза, содержащего множество микроорганизмов, или стимуляция развития почвенных микроорганизмов без внесения в почву для них источников углеродного питания. Первый путь активно используется и его эффективность хорошо известна. Однако количество навоза, которое необходимо вносить в почву для достижения желаемого результата — велико, а его доступность в связи с резким сокращением поголовья крупного рогатого скота в России — мала. Второй путь в настоящее время практически не используется. Исключением может стать предпосевная обработка семян препаратом «Альбит», основой которого является полибетагидроксимасляная кислота, стимулирующая рост бактерий.

Проблема закрепления аллелотоксинов в почвах является достаточно сложной, поскольку почвы нельзя рассматривать как обычные твердые сорбенты. Они имеют значительно более сложную структурную организацию. Почва представляет собой систему, образованную частицами различного размера, которые связаны почвенными гелями [30]. Основой этих почвенных гелей служит гумусовая матрица, образованная части-

цами гумусовых веществ размером 2...10 нм [30]. Поверхность частиц гумусовых веществ мозаична и состоит из гидрофильных и гидрофобных участков. При большом содержании воды в почве в подобных системах термодинамически выгодно образование связей между частицами гумусовых веществ через гидрофобные участки, а при малом содержании воды в почве — через гидрофильные участки (аналогия с поведением дифильных молекул поверхностно-активных веществ и образованием из них мицелл). Логично предположить [31], что в определенном интервале влажностей почв должен происходить структурный переход от связей частиц гумусовых веществ через гидрофобные участки поверхности к связям через гидрофильные участки. Показано [31, 32], что в результате подобного структурного перехода скачкообразно изменяются некоторые свойства почв.

Связь данного явления с аллелотоксичностью почв состоит в том, что, во-первых, структурный переход определяется не только влажностью почв и температурой, но и гидрофильно-гидрофобными характеристиками гумусовой матрицы, которые могут изменяться под влиянием вносимых в почву веществ. Так, многозарядные катионы могут увеличивать долю гидрофобности частиц гумусовых веществ, так же, как и сорбция на этих частицах органических молекул, имеющих большие гидрофобные участки. Во-вторых, в результате структурного перехода изменяются сорбционные свойства почв. При контакте частиц гумусовых веществ через гидрофобные участки должна уменьшаться доступность органических молекул, сорбированных на этих участках.

Из изложенного выше следует, что почва не является простым твердым сорбентом с определенной сорбционной емкостью и набором энергий связи адсорбата с адсорбентом. В результате структурного перехода ее сорбционные свойства могут претерпевать значительные изменения. Это не только накладывает определенные сложности при изучении закрепления аллелотоксинов в почвах, но и создает возможность снижения активности аллелотоксинов и ингибирующей способности почв путем их закрепления в гумусовой матрице.

Кардинально изменить источники поступления в почву и удаления аллелотоксинов из нее достаточно сложно, но можно воздействовать на прочность их связи с гумусовой матрицей почвенных гелей, активируя структурный переход в этой матрице, увеличивая тем самым энергию связи аллелотоксинов с гумусовой матрицей и снижая их действующую концентрацию в почвах. Подобный путь может оказаться достаточно эффективным, поскольку он основан на использовании ресурсов самих почв для закрепления аллелотоксинов.

Выводы

1. Аллелотоксичность почв — распространенное явление и обуславливает существенные потери урожая сельскохозяйственных культур. Использование севооборотов для борьбы с этим негативным явлением не всегда приемлемо и недостаточно эффективно.

2. Требуется разработка новых методов, позволяющих быстро снижать аллелотоксичность почв, в основе которых может лежать снижение концентрации аллелотоксинов в почвах путем активации развития микроорганизмов, способных использовать аллелотоксины в качестве источников углерода, или закрепление аллелотоксинов (снижение их активности) в гумусовой матрице почвенных гелей.

Список литературы

- [1] Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головкин Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
- [2] Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
- [3] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // *Bacteriological Reviews*, 1964, v.28, no.2, pp. 181–207.
- [4] Коношина С.Н. Влияние различных способов использования почвы на ее аллелопатическую активность. Дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, 2000. 145 с.
- [5] Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии. Орел: Орловский ГАУ, 2017. 166 с.
- [6] Лобков В.Т. Почвоутомление при выращивании полевых культур. М.: Колос, 1994. 112 с.
- [7] Blum U. Allelopathy: A Soil System Perspective // *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 299–340.
- [8] Vokou D., Chalkos D. and Karamanoli K. Microorganisms and Allelopathy: A One-Sided Approach // *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 341–371.
- [9] Млечко Е.А., Мотренко А.В. Аллелопатическое действие водного экстракта шалфея эфиопского (*Salvia Aethiopsis* L.) на прорастание семян тест-растений // *Вестник ВолГУ*, 2015. Сер. 9. Вып. 13. С. 10–14.
- [10] Симагина Н.О. Аллелопатический потенциал древесных растений // *Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского*. Сер. Биология, химия, 2013. Т. 26(65). № 1. С. 186–193.
- [11] Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications. Netherlands: Springer, 2006, 637 p.
- [12] 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.
- [13] Ghulam J., Shaikat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil — a review // *Annals of Microbiology*, 2008, 58 (3), pp. 351–357.
- [14] Зинченко М.К., Селицкая О.В. Биологическая токсичность серой лесной почвы в зависимости от систем удобрений // *Агрохимический вестник*, 2011. № 5. С. 38–40.
- [15] Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: МГУ, 1988. 220 с.
- [16] Шутко А.П. Биологическое обоснование оптимизации системы защиты озимой пшеницы от болезней в Ставропольском крае. Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.; Пушкин, 2013. 41 с.
- [17] Рудаков В.О., Рудаков О.Л. Природа почвенных фитотоксикозов и проблема защиты растений // *Агро XXI*, 2009. № 1–3. С. 11–13.
- [18] Rice E.L. Allelopathy. New York, London: Academic Press, 1984. 422 p.
- [19] ГОСТ Р ИСО 22030–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200077669> (дата обращения 18.02.2019).
- [20] Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Горепекин И.В. Методика для оценки эффективности действия стимуляторов прорастания семян // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2018. № 5. С. 3–10.
- [21] Кустова О.К. Аллелопатическое влияние послеуборочных остатков *OSIMUM BASILICUM* L // *Промышленная ботаника*, 2007. Вып. 7. С. 204–207.
- [22] Передериева В.М., Власова О.И., Шутко А.П. Аллелопатические свойства сорных растений и их растительных остатков в процессе минерализации // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 2011. № 73. URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/11.pdf> (дата обращения 18.02.2019).
- [23] Черняк Д.М. Аллелопатические свойства почв многолетних интродукционных насаждений *Heracleum Sosnowskyi* И *Heracleum Moellendorffii* // *Современные проблемы науки и образования*, 2017. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26901> (дата обращения 18.02.2019).
- [24] Abbas T., Zahir Z.A., Naveed M. Bioherbicidal activity of allelopathic bacteria against weeds associated with wheat and their effects on growth of wheat under axenic conditions // *International Organization for Biological Control (IOBC)*, 2017. DOI: 10.1007/s10526-017-9836-6
- [25] Jabran K., Mahajan G., Sardana V., B.S. Chauhan B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems // *Crop Protection*, 2015, v. 72, p. 57–65.
- [26] Annemieke van der Meulen A review of weed management in wheat using crop competition // *Crop Protection*, 2016, p. 1–7.
- [27] Farooq M., Bajwa A.A., Cheema S.A., Cheema Z.A. Application of allelopathy in crop production // *Int. J. Agric. Biol.*, 2013, v. 15, pp. 1367–1378.
- [28] 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), pp. 1083–1091.
- [29] Norouzi Y., Mohammadi G.R. and Nosratti I. Soil factors affecting the allelopathic activities of some plant species // *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 2015, 5(8), pp. 285–290.
- [30] Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей // *Почвоведение*, 2012. № 8. С. 908–920.
- [31] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Поздняков А.И., Пузанова А.Е. Структурный переход в гумусовой матрице почвенных гелей и его влияние на свойства почв // *Почвоведение*, 2014. № 9. С. 1056–1067.
- [32] Стаценко А.П., Гришин Г.Е., Чернышов В.Е. Способ оценки почвоутомления. Патент РФ 2181238, 2002. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2181238> (дата обращения 18.02.2019).

Сведения об авторах

Федотов Геннадий Николаевич — вед. науч. сотр., д-р биол. наук, Факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, gennadiy.fedotov@gmail.com

Шалаев Валентин Сергеевич — гл. науч. сотр., д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), shalaev@mgul.ac.ru

Батырев Юрий Павлович — доцент, канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 22.05.2019.

Принята к публикации 20.09.2019.

ALLELOTOXICITY OF SOILS, MECHANISMS OF ITS OCCURRENCE AND POSSIBLE WAYS OF REDUCTION

G.N. Fedotov^{1,2}, V.S. Shalaev², Yu.P. Batyrev²

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

The phenomenon alleloxicity of soils and its negative impact on plant development is considered. It is shown that the study of the soils chemical composition does not allow to determine unambiguously the presence of alleloxicity in soils and its value. Therefore, it is necessary to use biotesting methods to study alleloxicity of soils. It is established that the use of crop rotations only to combat soil alleloxicity does not completely solve the problem of soil fatigue. It is concluded that to reduce a soils alleloxicity is necessary to develop methods, which can be reduced concentration of allelotoxins in the soil by activating growth of microorganisms capable to use alleloxicity as sources of carbon or consolidation of allelotoxins (reduction of activity) in the humic matrix of soil gels.

Keywords: alleloxicity of soils, soil inhibition seed sprout growth, reducing toxicity, microorganisms, humic matrix of soil gels and fixing it allelotoxins

Suggested citation: Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. *Allelotoksichnost' pochv, mekhanizmy ee vozniknoveniya i vozmozhnye puti snizheniya* [Alleloxicity of soils, mechanisms of its occurrence and possible ways of reduction]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 37–42. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-37-42

References

- [1] Grodzinskiy A.M., Bogdan G.P., Golovko E.A., Dzyubenko N.N., Moroz P.A., Prutenskaya N.I. *Al-lelopaticheskoe pochvoutomlenie* [Allelopathic soil fatigue]. Kiev: Naukova dumka, 1979, 248 p.
- [2] Krasil'nikov N.A. *Mikroorganizmy pochvy i vysshie rasteniya* [Soil microorganisms and higher plants]. Moscow: AN SSSR, 1958, 464 p.
- [3] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residue. *Bacteriological Reviews*, 1964, v. 28, no. 2, pp. 181–207.
- [4] Konoshina S.N. *Vliyanie razlichnykh sposobov ispol'zovaniya pochvy na ee allelopaticheskuyu aktivnost'* [Influence of different methods soil use on its allelopathic activity]. Dis. ... kand. s.-kh. nauk. Orel, 2000, 145 p.
- [5] Lobkov V.T. *Ispol'zovanie pochvenno-biologicheskogo faktora v zemledelii: monografiya* [The use of soil and biological factors in agriculture]. Orel: OGAU, 2017, 166 p.
- [6] Lobkov V.T. *Pochvoutomlenie pri vyrashchivanii polevykh kul'tur* [Soil fatigue in cultivation of field crops]. Moscow: Kolos, 1994, 112 p.
- [7] Blum U. Allelopathy: A Soil System Perspective. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 299–340.
- [8] Vokou D., Chalkos D. and Karamanoli K. Microorganisms and Allelopathy: A One-Sided Approach. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 341–371.
- [9] Mlechko E.A., Motrenko A.V. *Allelopaticheskoe deystvie vodnogo ekstrakta shalfeya efjopskogo (Salvia Aethiopsis L.) na prorastanie semyan test-rasteniy* [Allelopathic effect of aqueous extract of Ethiopian sage (Salvia Aethiopsis L.) on seeds germination of test plants]. *Vestnik VolGU*, 2015, ser. 9, v. 13, pp. 10–14.
- [10] Simagina N.O. *Allelopaticheskii potentsial drevesnykh rasteniy* [Allelopathic potential of woody plants]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Ser. Biologiya, khimiya* [Scientific notes of Taurida National University. IN AND. Vernadsky. Ser. Biology, Chemistry], 2013, t. 26(65), no. 1, pp. 186–193.
- [11] Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Netherlands: Springer, 2006, 637 p.
- [12] 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.

- [13] 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 (3), pp. 351–357.
- [14] Zinchenko M.K., Selitskaya O.V. *Biologicheskaya toksichnost' seroy lesnoy pochvy v zavisimosti ot sistem udobreniy* [The biological toxicity of grey forest soil depending on the fertilizers system]. *Agrokhimicheskii vestnik* [Agrochemical Herald], 2011, no. 5, pp. 38–40.
- [15] Mirchink T.G. *Pochvennaya mikologiya* [Soil Mycology]. Moscow: MSU, 1988, 220 p.
- [16] Shutko A.P. *Biologicheskoe obosnovanie optimizatsii sistemy zashchity ozimoy pshenitsy ot bolezney v Stavropol'skom krae* [Biological basis of protection system optimization of winter wheat against diseases in the Stavropol region]. Dis. ... Dr. Sci. (Agric.). SPb., Pushkin, 2013, 41 p.
- [17] Rudakov V.O., Rudakov O.L. *Priroda pochvennykh fitosikozov i problema zashchity rasteniy* [The nature of the soil phytotoxicity and the problem of plant protection]. *Agro XXI*, 2009, no. 1–3, pp. 11–13.
- [18] Rice E.L. *Allelopathy*. New York, London: Academic Press, 1984, 422 p.
- [19] GOST R ISO 22030–2009. *Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Khronicheskaya fitotoksichnost' v otnoshenii vysshih rasteniy*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200077669> (accessed 18.02.2019).
- [20] Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P., Gorepekin I.V. *Metodika dlya otsenki effektivnosti deystviya stimulyatorov prorstaniya semyan* [Methods for evaluating the effectiveness of seed germination stimulants]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, no. 5, pp. 3–10.
- [21] Kustova O.K. *Allelopaticheskoe vliyaniye posleuborochnykh ostatkov Ocimum Basilicum L* [Allelopathic effect of post-harvest residues of *Ocimum Basilicum L*]. *Promyshlennaya botanika* [Industrial Botany], 2007, v. 7, pp. 204–207.
- [22] Perederieva V. M., Vlasova O. I., Shutko A. P. 2011. *Allelopaticheskie svoystva sornykh rasteniy i ikh rastitel'nykh ostatkov v protsesse mineralizatsii* [Allelopathy properties of weeds and plant residues in the process of mineralization]. *Polimatemicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of KubSAU], no. 73. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/11.pdf> (accessed 18.02.2019).
- [23] Chernyak D.M. *Allelopaticheskie svoystva pochv mnogoletnikh introduktsionnykh nasazhdeniy Heracleum Sosnowskiy i Heracleum Moellendorffii* [Allelopathic properties of soils long-term introduction plantings]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2017, no. 5. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26901>. (accessed 18.02.2019).
- [24] Abbas T., Zahir Z.A., Naveed M. Bioherbicidal activity of allelopathic bacteria against weeds associated with wheat and their effects on growth of wheat under axenic conditions. *International Organization for Biological Control (IOBC)*, 2017. DOI: 10.1007/s10526-017-9836-6 (accessed).
- [25] Jabran K., Mahajan G., Sardana V., B.S. Chauhan B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 2015, v. 72, p. 57–65.
- [26] Annemieke van der Meulen A review of weed management in wheat using crop competition. *Crop Protection*, 2016, p. 1–7.
- [27] Farooq M., Bajwa A.A., Cheema S.A., Cheema Z.A. Application of allelopathy in crop production. *Int. J. Agric. Biol.*, 2013, v. 15, pp. 1367–1378.
- [28] 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), pp. 1083–1091.
- [29] Norouzi Y., Mohammadi G.R. and Nosrati I. Soil factors affecting the allelopathic activities of some plant species. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 2015, 5(8), pp. 285–290.
- [30] Fedotov G.N., Dobrovol'skiy G.V. *Vozmozhnye puti formirovaniya nano- i mikrostruktur v gumu-sovykh veshchestvakh pochvennykh geley* [Possible ways formation of nano- and microstructures in humus substances of soil gels]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2012, no. 8, pp. 908–920.
- [31] Fedotov G.N., Shoba S.A., Pozdnyakov A.I., Puzanova A.E. *Strukturnyy perekhod v gumusovoy matritse pochvennykh geley i ego vliyaniye na svoystva pochv*. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2014, no. 9, pp. 1056–1067.
- [32] Statsenko A.P., Grishin G.E., Chernyshov V.E. *Sposob otsenki pochvoutomleniya* [Estimation method of soil fatigue]. Patent RU 2181238, 2002. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2181238> (accessed 18.02.2019).

Authors' information

Fedotov Gennadiy Nikolaevich — Senior Researcher, Dr. Sci. (Biology), Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

Shalaev Valentin Sergeevich — Dr. Sci. (Tech.) Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), shalaev@mgul.ac.ru

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.) Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@mgul.ac.ru

Received 22.05.2019.

Accepted for publication 20.09.2019