

УДК 633.31/.37:632.954:632.95.028

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ГЕРБИЦИДОВ ИЗ КЛАССА СУЛЬФОНИЛМОЧЕВИН НА РАЗВИТИЕ ВСХОДОВ ЛЮПИНА БЕЛОГО И МАША ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ¹

© 2023 г. С. В. Железова¹, В. Н. Колупаева¹, Е. В. Степанова^{1,*}, А. В. Мельников²,
М. А. Воронов³, А. Э. Степанова¹, В. Е. Веллер^{1,3}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Москва Россия

²Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”
143013 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Новоивановское, ул. Калинина, 1, Москва Россия

³Российская государственная аграрная академия—Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская 49, Москва Россия

*E-mail: jacky-st@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В серии последовательных вегетационных экспериментов по биотестированию на образцах дерново-подзолистой окультуренной почвы после ее обработки гербицидами из класса сульфонилмочевин: Магнум, ВДГ, метсульфурон-метил 600 г/кг, производство компании Август и Алистер Гранд, МД, дифлюфеникан 180 г/л + мезосульфуронметил 6.0 г/л, йодосульфурон-метил-натрий 4.5 г/л + + мефенпирдиэтил 27 г/л (антидот), производство компании Bayer. Была изучена остаточная фитотоксичность данных препаратов для проростков чувствительных культур люпина белого (*Lupinus albus*) и маша (*Vigna radiata*). Исходные почвенные образцы были отобраны в поле на 5-е сут после внесения гербицидов в полевых условиях в посевах озимой пшеницы при применении 2-х разных технологий обработки почвы: традиционной на основе отвальной вспашки и нулевой обработки. По результатам биотестирования образцов при температуре +20° и влажности на уровне 60% ПВ показано, что период полураспада гербицидов (DT_{50}) был достигнут через 40 ± 3 сут инкубирования, а детоксикация до уровня 70–80% наступила через 200–240 сут после внесения гербицидов в почву. Независимо от способа обработки почвы и примененного гербицида спустя 2 года после применения гербицидов было выявлено угнетение тест-культур на уровне >10% от контроля. Люпин белый и маш обладают высокой чувствительностью к воздействию микроколичеств гербицидов группы сульфонилмочевин, поэтому рекомендовано использовать эти тест-культуры для определения остаточной фитотоксичности почвы. Показано проявление последствия сульфонилмочевин на бобовых культурах, что важно даже в специализированных севооборотах, разработанных для нулевой обработки почвы.

Ключевые слова: сульфонилмочевины, остаточная фитотоксичность, последствие гербицидов, люпин белый (*Lupinus albus*), маш (*Vigna radiata*).

DOI: 10.31857/S0002188123110169, EDN: PWRENV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время зарегистрировано около 30 действующих веществ класса сульфонилмочевин, которые используют более чем в 80 странах мира [1–3]. В России гербициды этого класса стали активно применять в растениеводстве с начала 1990-х гг. [3, 4], к настоящему времени они заняли лидирующее положение по объему примене-

ния, и масштабы их использования неуклонно растут [3, 5, 6]. В качестве действующего вещества в этих гербицидах применяют хлорсульфурон, метсульфурон-метил, триасульфурон, римсульфурон, просульфурон, никосульфурон, сульфометурон-метил и другие соединения этого класса. Их использование требует особой осторожности, т.к. высокая фитотоксичность в почве сохраняется длительное время, и оказывая угнетающее действие на чувствительные культуры в севообороте через год и более после их применения [4–12]. Особенно ярко проявления фитотоксичности

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания НИОКТР при государственном бюджетном финансировании, проект FGGu-2022-0012.

спустя длительное время после внесения отмечают в степных регионах Поволжья, на черноземных и каштановых почвах, где негативное влияние от использования этих гербицидов выявлено в течение полутора–двух вегетационных сезонов, а в отдельных случаях — до 5 лет, например для культуры нута [5]. Согласно ранее опубликованным данным и действующему регламенту применения пестицидов [3, 4, 8–11], наиболее чувствительны к остаточным количествам сульфонилмочевин бобовые культуры, подсолнечник, крестоцветные масличные (горчица, рапс), капуста, свекла, картофель, овощи семейства тыквенные (огурец, кабачок, арбуз), соя, гречиха. Отмечено, что применение сульфонилмочевин в зерноовощных севооборотах приводит к значительному снижению биомассы картофеля в следующем сезоне после применения гербицида [13]. Риск последствия сульфонилмочевин снижается при кислой реакции почв и их высокой влагонасыщенности в течение вегетационного сезона. В подобных условиях химическое разложение гербицидов проходит быстрее, особенно таких соединений как хлорсульфурон, триасульфурон, метсульфурон-метил, которые довольно быстро разлагаются в условиях кислой среды [14, 15].

“Скрытое проявление отрицательного действия остатков гербицидов выражается 3–30%-ным снижением урожая сельскохозяйственных культур” — отмечено в [5]. При этом нет явных заметных изменений внешнего вида чувствительных растений. Скрытые изменения роста и развития растений можно обнаружить только при сравнении со здоровыми растениями, выращенными на чистой почве без остаточного содержания гербицидов. Как правило, в производственных условиях не оставляют контрольных полос без обработки гербицидами для сравнения. В таких случаях для оценки остаточной фитотоксичности можно воспользоваться методами биотестирования в лабораторных условиях [16, 17]. Биотестирование основано на проявлении реакции тест-культур на экзогенное воздействие, что отражается в снижении их тест-параметров: энергии прорастания, всхожести семян, длине корня, длине побега и др. Биотестирование может быть проведено в том числе методом экспресс-биотеста продолжительностью 72 ч (оценка угнетения прорастания семян) или методом вегетационного эксперимента сроком 2–4 нед с выращиванием тест-культур в вегетационных сосудах и оценкой их тест-отклика. Высокая чувствительность данного метода позволяет определять концентрации остаточных количеств на уровне 0.08–0.10 мкг/кг почвы, что в 20–30 раз превышает чувствительность метода

высокоэффективной жидкостной хроматографии [5] для определения сульфонилмочевин. В связи со специфической реакцией отдельных видов тест-культур на различные загрязнители и стрессовые факторы [16, 18], а также с особенностями поступления веществ и их метаболизма в растениях, выбор растений-индикаторов является важной методической задачей. Зернобобовые культуры широко возделывают во многих областях Черноземной зоны [19, 20], и они имеют большой потенциал для возделывания в Нечерноземной зоне [21, 22]. Некоторые виды бобовых могут быть использованы в качестве высокочувствительных тест-культур.

Цель работы — методами биотестирования на проростках 2-х видов бобовых культур оценить проявление фитотоксичности дерново-подзолистой почвы в течение 2-х лет после применения гербицидов класса сульфонилмочевин Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования была фитотоксичность почвы, оцениваемая по развитию проростков семян люпина белого (*Lupinus albus*) и маша (*Vigna radiata*). Всходы данных культур были выращены в вегетационных экспериментах в лабораторных условиях на образцах дерново-подзолистой почвы, содержащих гербициды группы сульфонилмочевин Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД, после их применения в полевых условиях согласно действующему регламенту [23].

Почвенные образцы были отобраны однократно, на 5-е сут после применения гербицидов. План данного вегетационного эксперимента включал последовательные сетки биотестирования с разными тест-культурами в течение 2.5 лет при переменном инкубировании почвы во влажном и сухом состоянии. В данной работе представлены результаты 3-х сетов биотестирования только на бобовых культурах маша и люпина, начало сетов — на 5-, 330- и 730-е сут после внесения гербицида. Биотестирование проводили согласно ГОСТ [24, 25].

Почвенные образцы. Образцы были отобраны в полевых условиях на поле № 1 Центра точного земледелия Полевой опытной станции РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева (N 55.8369°; E 37.5636°) [26]. Почва участка — агродерново-подзолистая, легкосуглинистая, кислая (рН от 4.5 до 5.5 ед.), обеспеченность легкодоступным фосфором — высокая (180–250 мг/кг почвы), легкодоступным калием — средняя и высокая (70–150 мг/кг почвы), что достигнуто путем внесения минеральных

удобрений в рекомендуемых дозах под каждую культуру севооборота.

Отбор почвенных образцов для биотестирования проводили осенью 2020 г. на 5-е сут после обработки посевов озимой пшеницы одним из гербицидов класса сульфонилмочевин. В исследовании сравнивали 2 гербицида: 1 — Магнум, ВДГ, метсульфурон-метил 600 г/кг, производство компании Август; 2 — Алистер Гранд, МД, дифлюфеникан 180 г/л + мезосульфуронметил 6.0 г/л, йодосульфурон-метил-натрий 4.5 г/л + мефенпирдиэтил 27 г/л (антидот), производство компании Bayer. Внесение гербицидов в баковой смеси с фунгицидом осуществляли с помощью опрыскивателя UF 901 AMAZONE. Нормы внесения гербицидов были выбраны согласно Каталогу пестицидов и агрохимикатов [23] на объем рабочей жидкости 250 л: Магнум 10 г/га, Алистер Гранд 0.6 л/га. Таким образом, внесение гербицида проводили по стандартной методике осеннего применения, апробированной и рекомендованной для условий Нечерноземья [14]. Согласно схеме многолетнего опыта [26], на поле поддерживают стационарные делянки с 2-мя видами обработки почвы в двукратной повторности: традиционной и минимальной. Под пшеницу используют: вариант 1 — традиционная обработка на основе вспашки с оборотом пласта (далее отвальная вспашка), вариант 2 — ресурсосберегающая нулевая обработка (далее нулевая обработка). Полевой опыт по внесению гербицидов при разных обработках почвы заложен методом расщепленных делянок: полосы обработки гербицидами Магнум и Алистер Гранд были заложены на поле вдоль рядков посевов и чередовались в пространстве так, чтобы на каждый способ обработки почвы приходилась обработка одним из двух гербицидов. Таким образом, в эксперименте на определение остаточной фитотоксичности почвы после применения сульфонилмочевин сравнивали 4 варианта обработка почвы + гербицид, заложенные в поле в двукратной повторности.

Суммарная площадь каждого варианта опыта составляла 0.2 га. В каждом из этих вариантов было отобрано по 12 индивидуальных почвенных образцов из поверхностного слоя почвы (0–5 см). Помимо этого, в непосредственной близости от опытного поля на залежном участке была отобрана чистая почва без гербицидов в качестве контроля.

Все почвенные образцы до начала биотестирования хранили в морозильной камере при -23° в плотной полиэтиленовой упаковке без доступа воздуха. Перед началом биотестирования образцы размораживали в упаковке в комнатных условиях в течение 4–5 ч. После размораживания и

первого биотестирования использованные образцы повторно не замораживали, а последовательно использовали в последующих биотестах в течение 2-х лет. Тест-культуры и даты последовательных 6-ти серий биотестирования: люпин (ноябрь 2020 г.), картофель (март 2021 г.), горчица (май 2021 г.), люпин (сентябрь 2021 г.), горчица (октябрь 2021 г.), маш (ноябрь 2022 г.). В 2023 г. эксперимент продолжают с картофелем. В данной работе описаны только результаты 3-х серий биотестирования на бобовых культурах (дважды с люпином, однократно с машем).

Методика биотестирования. В данном эксперименте в качестве тест-культур были использованы люпин белый (*Lupinus albus* L.) сорта Детер 1 (масса 1000 зерен — 308 г, урожай 2020 г.) и маш (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) сорта Салтан (масса 1000 зерен — 38 г, урожай 2021 г.).

Биотестирование было проведено двумя методами: 1 — экспресс-биотестирование на проростках люпина на почве в чашках Петри при инкубировании в течение 72 ч в термостате при 20°C без освещения. Проведено на свежих размороженных полевых образцах почвы с целью определения стартовых условий фитотоксичности почвы полевых образцов; 2 — биотестирование вегетационным методом на всходах люпина и маша на почве в вегетационных сосудах в течение 3 (4)-х нед в контролируемых условиях температуры и освещенности в лаборатории искусственного климата с необходимым поливом вегетационных сосудов с целью определения остаточной фитотоксичности почвы.

В обоих методах биотестирования в течение всего эксперимента влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ, что было оптимальным условием для развития всходов. Во всех экспериментах биотестирования использованы контрольные образцы почвы без гербицида, а также на чистой почве дополнительно были созданы эталонные шкалы 2-х изученных гербицидов в разных концентрациях в почве: 0 (контроль без гербицида), 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 мг/кг почвы. Данная шкала охватывала широкий диапазон концентраций, включая рекомендуемые по регламенту дозы применения гербицида (табл. 1). Сопоставление доз гербицида в лабораторных опытах и полевых условиях проведено при принятии условий, что объемная масса почвы составляет 1.3 г/см^3 и в расчете учитывают поверхностный слой почвы мощностью 5 см. Согласно описанию гербицидов почвенного действия, после внесения они формируют так называемый “экран” эффективной концентрации в поверхностном (до 5 см) слое почвы.

Таблица 1. Шкала концентраций гербицидов Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД для проведения биотестирования на проростках чувствительных культур и сопоставление с полевыми концентрациями гербицидов, применяемых по регламенту

Доза гербицида в биотестах, мг/кг почвы	0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0
Концентрация	0	5×10^{-5}	1×10^{-7}	2×10^{-7}	5×10^{-7}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Соответствие дозе Магнум, рекомендуемой по регламенту	Контроль без гербицида	Доза 0.007–0.01 кг/га, в соответствии с регламентом		Дозы в 2–5 раз выше регламента		Дозы в 10–20 раз выше регламента		Доза в 50 раз выше регламента
Соответствие дозе Алистер Гранд рекомендуемой по регламенту		Остаточные количества	Дозы в 4–10 раз выше регламента		Доза 0.6–1 л/га, в соответствии с регламентом		Дозы в 2–5 раз выше регламента	

Таблица 2. Время и условия проведения биотестирования на проростках бобовых культур

Время после внесения, сут	Количество сетов инкубирования (и биотестирования) предшествовало, их продолжительность	Тест-культура	Метод, длительность теста
5	— (свежие образцы, без предварительного инкубирования)	Люпин	ЭТП на почве, 72 ч
330	2 сета: инкубация 30 и 21 сут при увлажнении 60% ПВ (высушивание по окончании)	Люпин	ВЭС, 21 сут
730	4 сета: инкубация 30, 21, 28 и 28 сут при увлажнении 60% ПВ (высушивание по окончании)	Маш	ВЭС, 28 сут

Примечание. ЭТП — экспресс-тест в чашках Петри, ВЭС — вегетационный эксперимент в сосудах.

Люпин и маш являются быстро растущими культурами, и их можно использовать как в экспресс-тестах в чашках Петри (ЭТП), так и в условиях вегетационного эксперимента в сосудах (ВЭС). В первом случае измеряют длину проростков и корней тест-культуры после 72 ч проращивания в условиях термостата без освещения. Во втором случае измеряют высоту и биомассу тест-культуры, выращиваемой в течение 3–4-х нед в контролируемых условиях освещения, полива и температуры в вегетационной камере.

На бобовых культурах было проведено 3 сета биотестирования в разные сроки после даты внесения гербицида и после проведения инкубирования почвы попеременно во влажном и сухом состоянии (табл. 2).

Последовательность подготовки и проведения биотестирования:

1. Подготовка почвы для шкалы концентраций гербицидов: использована воздушно-сухая дерново-подзолистая почва из поверхностного слоя 0–20 см (чистая, без гербицида), просеянная через сито 2 мм, смешанный образец. Навески почвы: по 70 г для экспресс-биотестов в чашках Петри, по 400 г для биотестирования в лабораторных сосудах, объем сосудов 0.4 л. Навески почвы для

приготовления шкалы концентраций были взяты в картонные стаканы с тонким полиэтиленовым покрытием стенок;

2. Подготовка стандартной шкалы гербицидов в почве. Рабочие водные растворы для достижения необходимой концентрации гербицидов (табл. 1) приготовлены непосредственно перед внесением в почву путем последовательного разбавления маточного раствора от высоких концентраций к малым. Внесение аналитической пипеткой с дозатором в воздушно-сухую почву по 1 мл рабочих растворов гербицидов в приготовленных концентрациях согласно шкале, в контрольном варианте — внесение в почву по 1 мл дистиллированной воды. Незамедлительное тщательное размешивание почвы в стакане сухим металлическим шпателем после внесения растворов в почву. Ожидание перед дальнейшим увлажнением почвы в течение 1 ч для установления равновесной сорбции гербицида;

3. Увлажнение почвы до оптимального показателя 60% ПВ:

— для экспресс-биотестирования в чашках Петри (биотест 1) после окончания периода ожидания (1 ч) перенос почвы в чашки Петри и увлажнение небольшими порциями воды (сум-



Рис. 1. Биотестирование тест-культуры люпина белого: (а) — предварительно пророщенные семена в чашках Петри с почвой, (б) — проростки люпина спустя 72 ч инкубирования в термостате при 20°C.

марно по 13 мл воды на навеску почвы 70 г). Установка закрытых чашек Петри вертикально на ребро, свободное легкое встряхивание почвы внутри чашек под крышкой, так, чтобы нижняя половина чашки была заполнена увлажненной почвой, а верхняя половина — воздухом. При необходимости проводили перемешивание почвы для более равномерного увлажнения. Ожидание равномерного увлажнения почвы в чашках Петри под крышками — 1 ч. После установления равномерного увлажнения осуществлен посев в чашки с подготовленной к посеву почвой (рис. 1);

— для биотестирования в вегетационных сосудах (биотесты 2 и 3) использованы картонные стаканы с полиэтиленовым покрытием стенок. После окончания периода ожидания (1 ч) также проводили увлажнение почвы в сосудах небольшими порциями воды, тщательно перемешивая после каждого добавления воды в почву (суммарно по 74 мл воды на навеску почвы 400 г). Ожидание равномерного увлажнения почвы в вегетационных сосудах под крышкой из полиэтиленовой пленки — 1 ч. После установления равномерного увлажнения сосуды с почвой были готовы к посеву;

— полевые свежие образцы почвы с гербицидом имели разную остаточную влажность (от 40 до 80% ПВ), которая была выравнена во всех вариантах опыта до 60% ПВ путем добавления необходимого количества воды (1–5 мл) или подсушивания в комнатных условиях в течение 1.0–1.5 ч. Необходимость выравнивания влажности образцов возникла только при подготовке биотеста в чашках Петри, т.к. этот эксперимент проводили на свежесобраных полевых образцах, имевших разную влажность. Биотесты в вегетационных сосудах были заложены на почве после ее использо-

вания в предыдущих сетах биотестирования и полного высушивания, следовательно, не было необходимости выравнивать влажность в разных образцах;

4. Посев осуществляли на поверхность почвы заранее замоченными в воде семенами люпина или маша. Замачивание семян проводили в плоском сосуде на фильтровальной бумаге 48 ч при +20°C под укрытием из полиэтиленовой пленки. Для посева выбирали равномерно набухшие семена с одинаковым размером зародышевого корня (2–3 мм). В чашки Петри сажали по 7 семян люпина (биотест 1), в вегетационные сосуды — по 7 семян люпина (биотест 2) и по 3 семени маша (биотест 3);

5. Учеты проводили для биотеста 1 через 72 ч (измерение длины проростков и корней), для биотестов 2 и 3 — через 28 и 21 сут соответственно (измерение высоты и биомассы надземной части растений).

Статистическая обработка результатов. Во всех экспериментах каждая концентрация по стандартной шкале гербицида была заложена в трехкратной повторности, контроль без гербицида — в шестикратной. Полевые образцы были представлены в шестикратной повторности для каждого из 4-х вариантов опыта (способ обработки почвы + гербицид). По результатам биотестирования с достаточной повторностью в каждом эксперименте было проведено сравнение отклика тест-культуры по оценке средних с применением доверительного интервала средних с уровнем значимости $p < 0.05$. Расчеты проведены с использованием стандартных алгоритмов в пакетах программ Microsoft Excel и STATISTICA.

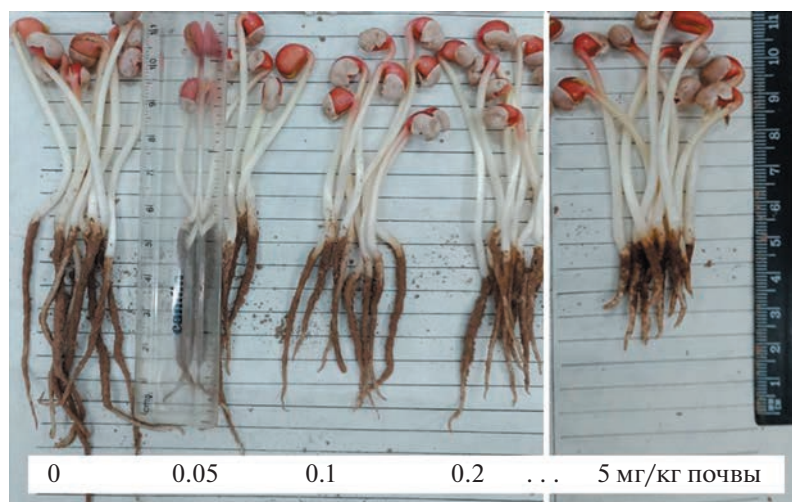


Рис. 2. Проростки люпина белого после 72 ч проращивания в термостате при 20°C на почве с разными концентрациями стандартной шкалы гербицида Магнум, ВДГ.

Три срока проведения биотестирования на 5-, 330- и 730-е сут после внесения гербицидов позволили судить о фитотоксичности почвы сразу после применения гербицидов, а также спустя 11 и 23 мес. По отклику тест-культур можно было оценить во времени процесс детоксикации изученных гербицидов в дерново-подзолистой почве.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биотест 1. После 72 ч биотестирования в термостате на почве, содержащей гербициды после их внесения в поле или при создании стандартной шкалы концентраций, измеряли длину корня, гипокотили и общую длину проростков люпина белого (рис. 2). Для всех образцов с гербицидами было показано, что, во-первых, очень высока вариабельность длины проростков в каждой чашке (особенно для гербицида Магнум), во-вторых, корни и надземная часть проростка (гипокотиль) по-разному реагировали на присутствие гербицида в почве. Так как повторность опыта была высокой, то благодаря этому удалось выявить статистически достоверную разницу длины проростков в целом и длины корней между вариантами (рис. 3). Корни люпина проявили высокую чувствительность и в присутствии гербицидов в разных концентрациях были угнетены, в то время как на гипокотилих было выявлено компенсационное развитие без признаков угнетения и в некоторых случаях даже со стимуляцией роста.

Длина корней проростков люпина под воздействием гербицида Алистер Гранд снижалась по сравнению с контролем без гербицида на 30% в варианте вспашки и на 25% в варианте с нулевой

обработкой. Гербицид Магнум способствовал снижению длины корней люпина на 30% в обоих вариантах обработки почвы (рис. 3).

При сравнении одинаковых шкал концентраций 2-х гербицидов было выявлено, что угнетающее действие гербицида Алистер Гранд на проростки люпина возрастало с ростом концентрации гербицида в почве (рис. 3а), для гербицида Магнум такой зависимости выявлено не было (рис. 3б). Сопоставление результатов угнетения роста люпина в полевых условиях и в опыте со шкалой гербицидов позволило предположить, что концентрация гербицида в полевых условиях была меньше, чем 0.05 мг/кг почвы для гербицида Алистер Гранд, и примерно 0.05 мг/кг почвы — для гербицида Магнум. Эти концентрации можно считать “стартовыми условиями” для дальнейших биотестов на этих же образцах почвы.

Биотест 2. Вегетационный эксперимент продолжительностью 21 сут был проведен на тест-культуре люпина с теми же образцами почвы спустя 11 мес. после внесения гербицидов. За этот период времени между первым экспериментом на проростках и данным экспериментом было проведено еще 2 полноценных вегетационных эксперимента (с картофелем 30 сут и горчицей 21 сут) с поддержанием влажности почвы на уровне 60% ППВ. В промежутках между данными экспериментами почвенные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния. Следовательно, почва подвергалась переменному инкубированию, что способствовало разложению гербицидов. Интерес представляла остаточная фитотоксичность почвы через 11 мес. после внесения гербицидов. Принципиальное отличие биотеста 1 и биотестов

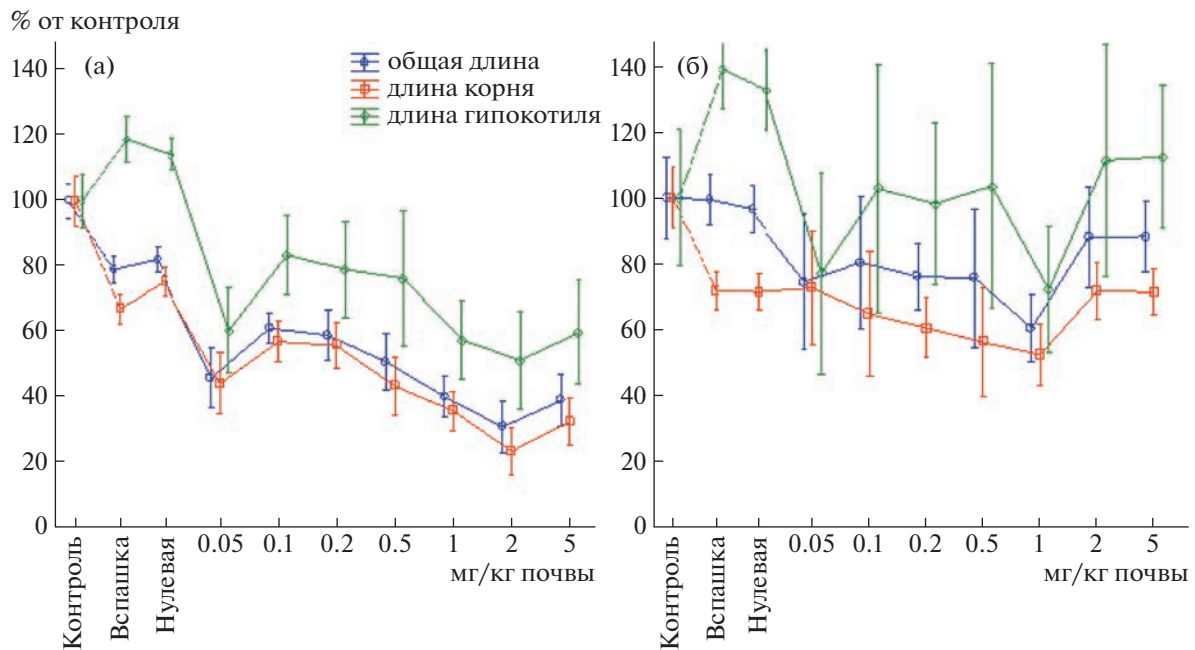


Рис. 3. Результаты проращивания (длина проростков, корней и гипокотилей люпина белого при биотестировании (72 ч, 20°C), % от контроля) на полевых образцах дерново-подзолистой почвы при ее разной обработке (вспашке, нулевой) через 5 сут после внесения гербицидов Алистер Гранд (а) и Магнум (б) в сравнении со шкалой концентраций данных гербицидов в почве. Планками погрешностей показаны границы доверительных интервалов при $p < 0.05$. То же на рис. 4, 5.

2 и 3 было в том, что в первом случае фитотоксичность почвы оценивали по длине корней, во втором и третьем — по длине (высоте) надземной части растений и их биомассе. В данном случае корни не учитывали, т.к. их было трудно извлечь из вегетационных сосудов без повреждения.

Под воздействием остаточных количеств гербицида в почве всходы люпина в течение всего эксперимента значительно отставали в росте от контрольного варианта без гербицидов (рис. 4а). Через 5 сут после посева различия между вариантами были еще не достоверными, но, начиная со 2-й нед, угнетающий эффект присутствия гербицида в почве был явным. Всходы люпина хуже всего развивались в варианте нулевой обработки + Магнум, где высота растений, начиная с 10-х сут наблюдения была на 30–40% меньше, чем в контрольном варианте (рисунок 4б), в то время, как в других вариантах опыта с гербицидами снижение роста составляло 20–30% по сравнению с контролем.

Биотест 2 был начат через 330 сут после внесения гербицидов в полевых условиях и завершен через 351 сут. По результатам биотеста 2 можно сделать вывод, что спустя почти год после внесения гербицидов Магнум и Алистер Гранд, их остаточные количества в почве все еще оказывали фитотоксическое действие на рост растений люпина белого. В этом эксперименте наиболь-

шую фитотоксичность наблюдали в варианте нулевой обработки + Магнум.

Биотест 3. Спустя еще 12 мес. после вегетационного эксперимента с люпином и после проведения еще 2-х серий попеременного инкубирования тех же самых почвенных образцов во влажном и сухом состоянии был заложен следующий вегетационный эксперимент на тест-культуре маша. Данный сет биотестирования в вегетационных сосудах был начат через 730 сут после внесения гербицидов в полевых условиях и закончен через 758 сут. Таким образом, с момента применения гербицидов прошло около 2-х лет, и до посева семян маша были проведены суммарно 4 серии биотестов с использованием различных тест-культур. Тем не менее, по истечении этого срока почва все еще обладала остаточной фитотоксичностью по отношению к тест-культуре маша.

Так же, как и всходы люпина в биотесте 2, всходы маша под воздействием остаточных количеств гербицида в почве в течение всего эксперимента значительно отставали в росте (рис. 5а). Контрольные растения на почве без гербицида опережали в росте тест-культуру на загрязненной почве в начале эксперимента на 40%, к концу эксперимента — на 20% (рис. 5б). Различные варианты примененного гербицида и обработки почвы в данном эксперименте по отклику тест-растений различались между собой незначимо. Это свиде-

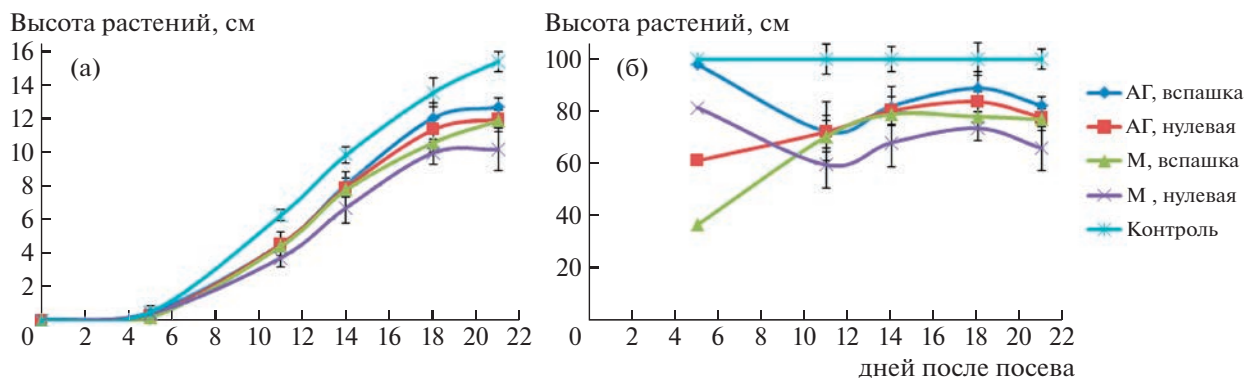


Рис. 4. Прирост тест-культуры люпина в высоту в присутствии остаточных количеств гербицидов Алистер Гранд (АГ) и Магнум (М) в почве через 330 сут после внесения гербицидов в сравнении с контролем без гербицида при биотестировании полевых образцов почвы в лабораторных условиях: (а) – высота растений, см, (б) – сопоставление высоты тестовых растений, % от контроля.

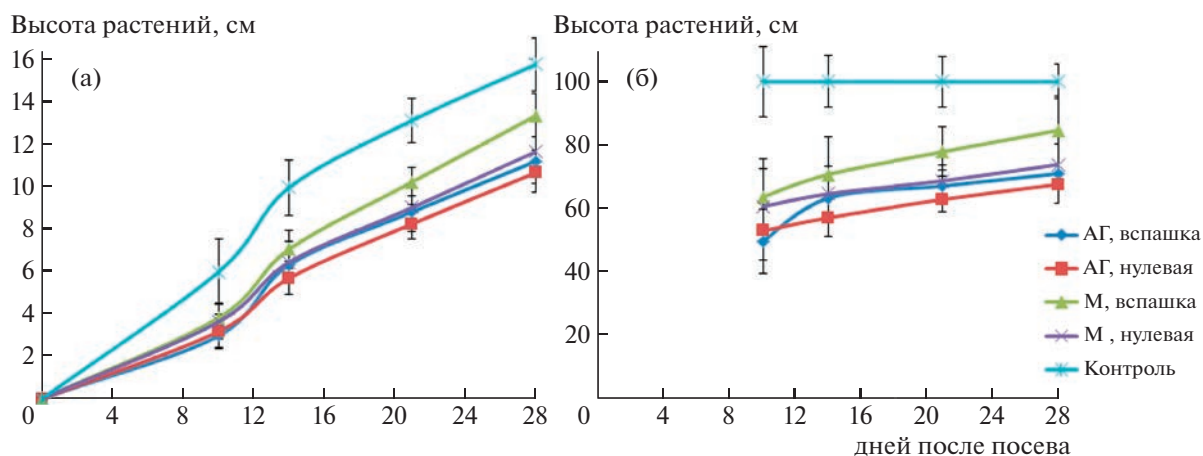


Рис. 5. Прирост тест-культуры маша в высоту в присутствии остаточных количеств гербицидов Алистер Гранд (АГ) и Магнум (М) в почве через 730 сут после внесения гербицидов в сравнении с контролем без гербицида при биотестировании полевых образцов почвы в лабораторных условиях: (а) – высота растений, см, (б) – сопоставление высоты тестовых растений, % от контроля.

тельство о том, что остаточная фитотоксичность стабилизировалась на примерно совпадающем уровне во всех вариантах, вызывая отставание в росте тест-культуры в среднем на 20–30%.

Помимо оценки высоты растений после завершения биотестов 2 и 3 был произведен учет биомассы и вычислено относительное содержание влаги в растениях (табл. 3). Сырая биомасса тест-растений и содержание влаги в них также были на 20–30% меньше при воздействии остаточных количеств гербицидов (табл. 1) по сравнению с тест-растениями на чистой почве без гербицидов. Судя по снижению биомассы, тест-культура маша была более чувствительной по отношению к остаточным количествам гербицидов, чем тест-культура люпина белого.

Двухлетнее попеременное инкубирование почвы во влажном и сухом состоянии в лабора-

торных условиях с выращиванием тест-культур лишь отчасти отражало естественные почвенные условия в поле, хотя и служило имитацией смены культур и условий в севообороте. Результаты представленного эксперимента дали возможность сделать выводы о процессах детоксикации почвы после применения гербицидов класса сульфонилмочевин и о возможных последствиях их применения в севообороте. В полевых условиях гербициды этой группы также проявляли достаточно высокую персистентность, что требует дополнительного изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам 3-х сетов биотестирования почвы на бобовых культурах (люпина белого и маша) методом проростков (инкубирование 72 ч)

Таблица 3. Сырая биомасса тест-растений (% от контроля) и содержание в них влаги (%) в конце эксперимента при воздействии остаточных количеств гербицидов Алистер Гранд (АГ) и Магнум (М) в дерново-подзолистой почве

Вариант	Биомасса сырая, % от контроля		Содержание влаги в растениях, %	
	люпин (биотест 2)	маш (биотест 3)	люпин (биотест 2)	маш (биотест 3)
Контроль без обработки	100 ± 7 ^{а*}	100 ± 8 ^а	88.5 ± 1.1 ^а	90.0 ± 0.9 ^а
АГ, вспашка	81.3 ± 7.1 ^б	57.7 ± 13 ^б	77.5 ± 3.3 ^б	82.1 ± 2.6 ^б
АГ, нулевая	76.0 ± 5.7 ^б	53.9 ± 7.7 ^б	73.8 ± 4.7 ^б	80.0 ± 2.5 ^б
М, вспашка	77.7 ± 5.8 ^б	55.7 ± 16.0 ^б	76.3 ± 4.4 ^б	82.9 ± 5.4 ^б
М, нулевая	71.3 ± 9.0 ^с	58.3 ± 25.0 ^б	69.5 ± 7.3 ^б	74.2 ± 6.1 ^б

*Для каждого столбца таблицы варианты опыта, отличающиеся друг от друга достоверно (при $p < 0.05$), помечены разными буквами.

и методом вегетационного эксперимента (длительность 3–4 нед) было показано, что при применении гербицидов класса сульфонилмочевин Магнум, ВДГ и Алистер Гранд, МД в рекомендованных дозах остаточная фитотоксичность слабокислой легкосуглинистой агродерново-подзолистой почвы может сохраняться до 2-х лет после применения указанных препаратов. Это проявлялось в угнетении роста использованных тест-культур на 20–30% по сравнению с контрольной группой растений, выращенной по той же технологии и на той же почве без применения гербицидов. Способ обработки почвы (вспашка или нулевая обработка) не оказывал значимого влияния на скорость детоксикации гербицидов в почвенных образцах, определенную методами биотестирования в лабораторных условиях, и через 2 года после применения гербицидов отклик тест-растений на остаточную токсичность почвы был одинаковым.

Авторы выражают благодарность коллегам из РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева за поддержку и сотрудничество научных коллективов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожкина Л.А., Поддымкина Л.М. Применение гербицидов и регуляторов роста в защите растений: учеб. пособ. М.: МЭСХ, 2021. 206 с.
2. Маханькова Т.А., Долженко В.И. Современный ассортимент гербицидов для защиты зерновых культур // Защита и карантин раст. 2013. № 10. С. 46–50.
3. Куликова Н.А., Лебедева Г.Ф. Гербициды и экологические аспекты их применения: учеб. пособ. М.: Кн. дом “ЛИБРОКОМ”, 2010. 152 с.
4. Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е. Последствие гербицидов на основе сульфурон-метила // Защита и карантин раст. 2003. № 3. С. 30–31.
5. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Сайфуллина Л.Б., Ленович Д.Р., Султанов А.С. Последствие гербицидов и динамика их разложения в различных агроландшафтах // Аграр. научн. журн. 2019. № 4. С. 27–31.
6. Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я., Халиков С.С., Музафаров А.М. Пути снижения фитотоксичности остатков сульфонилмочевин в почве с помощью антидотов // Агрохимия. 2020. № 5. С. 86–96.
7. Лебедев В.Б., Стрижков Н.И. Последствие гербицидов в севообороте // Агро XXI. 2007. № 4–6. С. 43–44.
8. Чернуха В.Г., Долженко В.И. Действие гербицидов на основе сульфонилмочевин на сорные и нецелевые растения // Изв. СПбГАУ. 2009. № 14. С. 10–15.
9. Милевская И.А. Эффективность применения препаратов на посевах пшеницы и их последствие на культуры зернопропашного севооборота // Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн. 2013. № 1. С. 121.
10. Березко М.Н. Последствие сульфонил-мочевинных гербицидов на последующие культуры севооборота // Пробл. механиз. Агрохим. обслуживания сел. хоз-ва. 2014. № 6. С. 113–117.
11. Дворянkin Е.А. Последствие гербицидов, применяемых на предшественнике, на растениях сахарной свеклы // Сахар. свекла. 2018. № 6. С. 27–31.
12. Стецов Г.Я. Последствие гербицидов в Западной Сибири // Защита и карантин раст. 2015. № 3. С. 17–19.
13. Филиппов А.В., Спиридонов Ю.Я. Гербицидные токсикозы картофеля // Защита и карантин раст. 2014. № 3. С. 44–46.
14. Спиридонов Ю.Я., Никитин Н.В., Протасова Л.Д., Абуликеров В.А., Спиридонова Г.С., Калимуллин А.Т., Спиридонова И.Ю., Босак Г.С. Итоги многолетнего изучения осеннего применения гербицидов в посевах озимой пшеницы в условиях центрального Черноземья РФ // Агрохимия. 2017. № 8. С. 53–67.
15. PPDB: Pesticide Properties DataBase <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/>
16. Шадрин Е.Г., Солдатова В.Ю., Макаров В.С. Биомониторинг: оценка качества среды. Новосибирск: Наука, 2017. 240 с.

17. Труфанов А.М., Шукин С.В., Воронин А.Н. Оценка влияния агротехнических приемов на состояние почвы методом биотестирования // Вестн. АПК Верхневолжья. 2022. № 2 (58). С. 5–11.
18. Al-Zahrani H.S., Alharby H.F., Hakeem K.R., Rehman R.U. Exogenous application of zinc to mitigate the salt stress in *Vigna radiata* (L.) Wilczek – evaluation of physiological and biochemical processes // Plants. 2021. V. 10. 1005. <https://doi.org/10.3390/plants10051005>
19. Дубинкина Е.А., Беляев Н.Н. Люпин белый и люпин узколистный в условиях Тамбовской области // Зернобоб. и круп. культуры. 2018. № 1 (25). С. 103–106.
20. Блинник А.С., Демидова А.Г., Лукашевич М.И., Артемова О.Ю., Наумкин В.Н., Наумкина Л.А. Сравнительное испытание сортов и образцов люпина белого селекции ВНИИ люпина в Центральном черноземном регионе // Зернобоб. и круп. культуры. 2022. № 3 (43). С. 41–49.
21. Яговенко Г.Л., Захарова М.В., Лукашевич М.И. Потенциал зерновой продуктивности люпина белого и его реализация в условиях Центральной нечерноземной зоны России // Зернобоб. и круп. культуры. 2020. № 2 (34). С. 35–40.
22. Конончук В.В., Никиточкин Д.Н., Тимошенко С.М., Назарова Т.О., Штырхунов В.Д., Шуркин А.Ю., Колотилина З.М. Зерновая продуктивность и азотфиксирующая способность люпина узколистного в зависимости от норм высева, удобрений и применения гербицидов при разных погодных условиях в центре Нечерноземной зоны России // Зернобоб. и круп. культуры. 2021. № 2 (38). С. 104–114.
23. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации в 2020 г. ГОСТ 32627-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения. Испытание на фитотоксичность (OECD, Test № 227: 2006, IDT). 2015. 20 с. ГОСТ 33061-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения: тест на всхожесть семян и развитие проростков (OECD, Test № 208: 2006, IDT).
24. Мельников А.В., Железова С.В. Традиционная вспашка или нулевая технология – что выгоднее для производства озимой пшеницы в Нечерноземной зоне России? // Теор. и прикл. пробл. АПК. 2019. № 1. С. 35–40. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1-35-40>

Effect of Sulfonylureas Residues on the Lupine and Vigna Seedlings Development during Biotesting Research on Sod-Podzolic Soil

S. V. Zhelezova^a, V. N. Kolupaeva^a, E. V. Stepanova^{a, #}, A. V. Melnikov^b,
M. A. Voronov^c, A. E. Stepanova^a, and V. E. Veller^{a, c}

^aAll-Russian Scientific-Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, pos. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Moscow Russia

^bFederal Research Center “Nemchinovka”
ul. Kalinina 1, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Novoivanovskoye 143013, Moscow Russia

^cRussian State Agrarian Academy – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127550, Russia

[#]E-mail: jacky-st@yandex.ru

In a series of consecutive vegetation experiments on biotesting on samples of sod-podzolic cultivated soil after its treatment with herbicides from the class of sulfonylureas: Magnum, VDG, metsulfuron-methyl 600 g/kg, manufactured by August and Alistair Grand, MD, diflufenican 180 g/l + mesosulfuronmethyl 6.0 g/l, iodosulfuron-methyl-sodium 4.5 g/l + mephenpyrdiethyl 27 g/l (antidote), manufactured by Bayer. The residual phytotoxicity of these preparations for seedlings of sensitive cultures of white lupin (*Lupinus albus*) and masha (*Vigna radiata*) was studied. The initial soil samples were taken in the field on the 5th day after herbicides were applied in the field in winter wheat crops using 2 different tillage technologies: traditional on the basis of dump plowing and zero tillage. According to the results of biotesting samples at a temperature of 20°C and humidity at the level of 60% soil moisture capacity, it was shown that the half-life of herbicides (DT_{50}) was reached after 40 ± 3 days of incubation, and detoxification to the level of 70–80% occurred 200–240 days after the introduction of herbicides into the soil. Regardless of the method of tillage and the applied herbicide, 2 years after the application of herbicides, the suppression of test crops at the level of $>10\%$ of the control was detected. White lupin and mash are highly sensitive to the effects of micro-quantities of herbicides of the sulfonylurea group, therefore it is recommended to use these test cultures to determine the residual phytotoxicity of the soil. The manifestation of the aftereffect of sulfonylureas on legumes is shown, which is important even in specialized crop rotations designed for zero tillage.

Keywords: sulfonylureas, residual phytotoxicity, herbicide aftereffect, white lupin (*Lupinus albus*), mash (*Vigna radiata*).