

Применение микробных биотехнологий для устранения в почве остатков гербицидов классов имидазолинонов и сульфонилмочевин (обзор)

© 2023. О. В. Колотова^{1,2}, к. т. н., доцент, старший инженер-биолог,
Е. Э. Нефедьева^{1,2}, д. б. н., профессор, зав. испытательным биологическим центром,
И. Р. Грибуст², к. б. н., ведущий инженер-биолог,
Е. А. Сухова^{1,2}, аспирант, инженер-биолог, Е. А. Звада¹, магистрант,
В. В. Шевелёва¹, магистрант,

¹Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28,

²ООО «АгроЭкспертГруп»,
107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 40, стр. 13, пом. 811,
e-mail: olgakolotova@mail.ru

Обзор посвящён проблемам применения современных имидазолиновых и сульфонилмочевинных гербицидов, а также разработкам в области микробной биотехнологии для ремедиации загрязнённых почв. В статье приведены данные о характере действия остаточных количеств гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин на целевые и последующие культуры в севооборотах. Показаны проблемы мониторинга остатков гербицидов в связи с разнообразием свойств компонентов и механизмов разложения в почве. Рассматриваются экологические аспекты влияния имидазолинонов и сульфонилмочевин на микробиоту почвы и нецелевые организмы. Приводятся результаты исследований путей биодеградации компонентов гербицидов, а также условий, способствующих ускорению деструктивных процессов. Обоснована актуальность поиска микроорганизмов-деструкторов имидазолинонов и сульфонилмочевин для получения биопрепаратов. Показано, что деструктивным потенциалом в отношении имидазолинонов и сульфонилмочевин обладают микроорганизмы разных родов: *Rhodococcus*, *Rahnella*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Methylopila*, *Ancylobacter*, *Hansschlegelia*, *Klebsiella*, *Arthrobacter*. Приводятся современные данные о разработках биопрепаратов для устранения остаточных количеств имидазолинонов и сульфонилмочевин в почвах для снижения фитотоксического эффекта.

Ключевые слова: гербициды, имидазолиноны, сульфонилмочевины, микрофлора почвы, биодеструкция, микроорганизмы, биопрепараты, ремедиация почв.

Application of microbial biotechnologies to eliminate residues of herbicides of imidazolinone and sulfonylurea classes in soil (review)

© 2023. O. V. Kolotova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2206-2822,
E. E. Nefedieva^{1,2} ORCID: 0000-0002-4782-3835, I. R. Gribust² ORCID: 0000-0002-7544-674X,
E. A. Sukhova^{1,2} ORCID: 0000-0002-3171-7106, E. A. Zvada¹ ORCID: 0000-0002-6872-0659,
V. V. Sheveleva¹ ORCID: 0000-0003-2815-2463

¹Volgograd State Technical University,
28, Lenina Avenue, Volgograd, Russia, 400005,
²ООО «АгроExpertГруп»,
room 811, p. 13, 40, Bolshaya Semenovskaya St., Moscow, Russia, 107023,
e-mail: olgakolotova@mail.ru

The review is devoted to the problems of application of modern imidazolinone and sulfonylurea herbicides, as well as to the researches in the field of microbial biotechnology for remediation of contaminated soils. Data on the traits of the influence of residual amounts of herbicides from the classes of imidazolinones and sulfonylureas on target and subsequent crops in crop rotations are given in the article. The problems of monitoring of herbicide residues due to the variety of properties of components and decomposition mechanisms in the soil are shown. Ecological aspects of the influence of imidazolinones and sulfonylureas on soil microbiota and non-target organisms are considered. The results of

studies of the biodegradation pathways of herbicide components, as well as conditions that contribute to the acceleration of destructive processes, are presented. The relevance of the search for microorganisms-destroyers of imidazolinones and sulfonylureas for the production of biological products is substantiated. Microorganisms of different genera, such as *Rhodococcus*, *Rahnella*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Methylophil*, *Ancylobacter*, *Hansschlegelia*, *Klebsiella*, and *Arthrobacter*, possess destructive potential against imidazolinones and sulfonylureas. The current data on the development of biological products to eliminate residues of imidazolinones and sulfonylureas in soils to reduce the phytotoxic effect are given.

Keywords: herbicides, imidazolinones, sulfonylureas, soil microflora, biodestruction, microorganisms, biological products, soil remediation.

Загрязнение биосферы пестицидами – одна из наиболее актуальных проблем современной экологии. Опасность представляют как сами действующие вещества пестицидных препаратов, так и различные их компоненты: ПАВы, растворители, адъюванты и т. д. По данным на начало 2019 г. среди применяемых на территории Российской Федерации (РФ) пестицидов 97,6% от общего объёма (63,48 тыс. т) составили химические средства защиты растений (ХСЗР). Больше всего было использовано гербицидов. В 2018 г. объём использованных гербицидов составил 36,2 тыс. т, или 55,6% от общего объёма пестицидов [1]. Растут в России и площади применения пестицидов. По данным Российского Союза производителей ХСЗР, на фоне высокого спроса на сельхозпродукцию, развития технологий, направленных на повышение урожайности, увеличивается потребление химических средств защиты растений. В 2020 г. общий объём применённых препаратов составил 188 тыс. т, по итогам 2021 г. – около 210 тыс. т. Гербицидный рынок занимает, по разным данным, от 60 до 70% от всей производимой пестицидной продукции [1]. Приведённые данные показывают возрастающие масштабы применения гербицидов в РФ, что несомненно усугубляет проблемы, связанные с накоплением остаточных количеств препаратов в объектах окружающей среды (ОС), в первую очередь, в почве, а также связанные с фитотоксическим последствием и ограничением севооборота, негативным влиянием на культивируемые растения и фауну. В дополнение к проблеме устойчивости, применение и чрезмерное использование гербицидов привело к образованию и накоплению метаболитов – продуктов деградации действующих и вспомогательных веществ препаратов в ОС. Эти соединения сохраняются в почве и растениях и приводят к потенциальным токсикологическим проблемам, вызванным накоплением остатков в пищевых цепях [2]. Аккумуляция и миграция токсичных компонентов пестицидов приводит к увеличению экологической нагрузки на поверхностные водоёмы и гидробионтов

[3]. Постоянное применение ядохимикатов с целью защиты растений дополнительно снижает устойчивость агроценозов ввиду токсичности компонентов для микробиоты почвы и насекомых-опылителей [4]. Немаловажен также аспект, связанный с влиянием гербицидов на микрофлору почвы, осуществляющей важнейшие функции синтеза и деградации органических веществ, азотфиксации, гумификации, круговорота биогенных элементов и др. Внесение и накопление гербицидов может приводить к локальным для данной территории перерождениям микробных комплексов, а, следовательно, и нарушениям указанных биогеохимических процессов [5].

Среди наиболее часто применяемых на территории России гербицидов препараты из классов имидазолинонов (ИМ) и сульфонилмочевин. В ассортименте современных гербицидов свыше 25% действующих веществ (д. в.) представлены соединениями, относящимися к классу производных сульфонилмочевин и имидазолинона [6].

Сульфонилмочевин – весьма перспективный класс химических соединений, к которому принадлежат гербициды нового поколения, проявляющие гербицидную активность при нормах расхода на 1–2 порядка ниже по сравнению с традиционно применяемыми препаратами. Имидазолиноны – также, как сульфонилмочевин, принадлежат к относительно новому классу (в мире применяются с 1984 г.) высокоактивных и высокоизбирательных гербицидов [7].

Цель работы – провести анализ современных разработок в области создания и применения биопрепаратов для снижения нагрузки на окружающую среду от гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является обзор современных разработок в области создания и применения биопрепаратов на основе микроорганизмов-деструкторов имидазолинонов и сульфонилмочевин. В составлении обзо-

ра по данной теме использовали литературные источники (2004–2023 гг.) из базы данных научной электронной библиотеки, включающей публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей по этой тематике. Поиск источников проводили на сайте eLIBRARY.RU, а также при помощи поисковых систем Яндекс и Google по следующим запросам: «имидазолиноны», «сульфонилмочевины», «последствие имидазолинонов и сульфониломочевин», «биодеструкция имидазолинонов», «биодеструкция сульфониломочевин», «биопрепараты для ремедиации почв», «остаточные количества гербицидов».

Механизмы действия и проблемы применения гербицидов из классов имидазолинонов и сульфониломочевин

Имидазолиноны (имазакин, имазаметабенз-метил, имазамокс, имазапик, имазапир, имазетапир) представляют класс гербицидов, которые были быстро приняты сельскохозяйственными производителями для борьбы с однодольными и двудольными сорняками, а также для уничтожения другой нежелательной растительности. Имидазолиноны поглощаются листьями и корнями и проникают в меристему – ткань, обеспечивающую рост растений.

Механизм действия гербицидов ИМІ включает ингибирование в восприимчивых видах растений ферментов ацетолактат-синтетазы и ацетогидроксикислот-синтетазы, которые необходимы для биосинтеза аминокислот с разветвлённой цепью (валина, изолейцина и лейцина). Это, в свою очередь, приводит к нарушению процессов синтеза белка, ДНК, прорастания семян и роста растений.

Гербициды ИМІ имеют в своей молекулярной структуре хиральное имидазольное соединение, обуславливающее их биологическую активность.

Вместе с тем, в настоящее время хиральные гербициды представляют собой новый и важный класс загрязнителей ОС [8, 9]. В РФ и странах ЕАЭС максимально допустимые уровни имидазолинонов в пищевом сырье и продукции определены в ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна». Согласно ему, содержание имазакина в соевых бобах не должно превышать 0,1 мг/кг. Для имазамокса установлены следующие нормы: в сое и горохе – не более 0,05 мг/кг, в рапсе и подсолнечнике – не более 0,1 мг/кг, для имазапипира в подсолнечнике – не более 0,1 мг/кг, для имазетапипира в сое

и бобах – не более 0,5 мг/кг. В Евросоюзе в настоящее время нормы некоторых имидазолинонов в пищевом сырье и продукции как растительного, так и животного происхождения рекомендованы к пересмотру. Так, максимально допустимый уровень (МДУ) имазамокса в сое и горохе предлагается снизить с 0,05 до 0,01 мг/кг. Максимально допустимые уровни для имазапипира в бобовых, подсолнечнике, рапсе и сое напротив, предлагается повысить с 0,01 до, соответственно, 0,3 или 0,2 мг/кг, 0,08 или 0,05 мг/кг, 0,05 мг/кг и 5 или 3 мг/кг. Для имазетапипира, который не допущен к использованию в странах Евросоюза, МДУ в пищевой продукции составляет 0,01 мг/кг [10, 11].

На практике основными экологическими проблемами при применении гербицидов являются их фитотоксичность по отношению к защищаемым культурам и последующим культурам в севообороте [12]. В связи с высокой биологической эффективностью использование имидазолиноновых гербицидов – адекватный и экономически выгодный способ управления сеgetальным компонентом фитоценоза в системе технологических приёмов интенсивного растениеводства. Регламенты применения препаратов этой группы гербицидов чётко обозначены и предполагают соблюдение мер, исключающих гербицидные токсикозы и фитотоксическое последствие. Однако вследствие широкой поливариантности почвенно-климатических условий даже при соблюдении агротехнических и регламентирующих требований установлены случаи угнетения посевов [13].

При изучении имазамокса и имазетапипира в качестве д. в. гербицидов была описана и установлена сорто- и фазоспецифичность реакций группы зернобобовых культур: высокую чувствительность продемонстрировала вика яровая, среднюю – клевер ползучий, козлятник восточный, лядвенец рогатый, люцерна посевная. Низко-чувствительным в опытах был люпин узколистный. А относительную устойчивость продемонстрировали горох, соя и бобы кормовые [14, 15].

Посевы чувствительной культуры горчицы белой показали, что через 350 сут после внесения имазамокса не оказывал никакого влияния. А имазетапипир привёл к более чем 60%-ному снижению урожая. Имазапипир по сравнению с имазамоксом уже при норме 30 г/га приводит к угнетению гороха. Свёкла, горчица, рапс реагируют на норму от 0,01 до 0,8 мг/кг.

Сложность аналитического определения остаточных количеств имидазолинонов (за частую концентрации д. в. в почве находятся за пределами чувствительности аналитических систем) обуславливает отсутствие чётких представлений о механизмах и сроках их деградации в ОС. Предполагается, что к концу вегетации в почве при благоприятных условиях остаётся не более 2% внесённой дозы препарата, но показатель может приближаться и к 30% [16, 17]. Минимальные количества имазапиром могут сохраняться в почве до двух лет и проявляться в виде сильной фитотоксичности для чувствительных культур. Имазамокс чрезвычайно токсичен для высших водных растений и водорослей. Имеются сведения и об эффекте скрытых токсикозов у устойчивых культур, когда без видимых признаков угнетения фитоценоз снижает продуктивность на 15–20% [13].

Сульфонилмочевинные гербициды по объёму применения в растениеводстве в РФ уже не одно десятилетие занимают лидирующие позиции, и масштабы их использования неуклонно растут. В практике народного хозяйства гербициды из производных этого класса применяются практически на всех основных сельскохозяйственных культурах как в виде препаратов на основе индивидуальных действующих веществ, так и в виде различных комбинаций с другими гербицидами.

Сульфонилмочевинны относятся к селективным наземным гербицидам гормонального типа, подавляют образование аминокислот изолейцина и валина, нарушают процессы деления клеток и биосинтеза ДНК, что и приводит к подавлению роста сорняков. Сульфонилмочевинны быстро и легко проникают через листья, а также частично через корни растений.

Наиболее широкомасштабное использование в народном хозяйстве РФ нашли следующие гербициды этого химического класса: хлорсульфурон, метсульфурон-метил, триасульфурон, римсульфурон, просульфурон, никосульфурон и сульфометурон-метил.

При крайне благоприятных токсикологических характеристиках сульфонилмочевин потенциальную опасность представляет их высочайшая фитотоксичность по отношению ко многим культурным растениям. Такие важнейшие сельскохозяйственные культуры как злаки (пшеница, рожь, ячмень, овёс) относительно устойчивы к сульфонилмочевинам, но возникает проблема с выращиванием культур, следующих в севообороте за злаками [18].

Особенно это касается регионов с чернозёмными и каштановыми почвами, где отрицательное последствие от использования этих гербицидов отмечается в течение 1,5–2 вегетационных сезонов и может проявляться на уровне 15–25% снижения урожая сельхозкультур. Снижение урожайности исследователи объясняют ингибированием метаболических процессов на ферментативном уровне, когда заметных изменений внешних признаков у чувствительных растений – пожелтения листьев, их деформации, искривления стебля – не наблюдается, а может отмечаться лишь некоторое утончение стебля, уменьшение листовых пластинок и т. п. В отсутствие контрольных (необработанных гербицидом) полос такое снижение урожайности может оставаться незамеченным [19].

Исследования показывают, что остаточные количества гербицидов на основе хлорсульфурона и метсульфурон-метила могут повреждать ряд культур, следующих за зерновыми: сахарную свёклу, сою, рапс, кукурузу и другие. Подтверждением фитотоксического действия остатков сульфонилмочевин в почве является снижение в 2–9 раз урожая льна, сахарной свёклы, чечевицы, гороха и картофеля, полученных через 1 год после обработки участка хлорсульфуронном в дозе 10–40 г/га. Остатки метсульфурон-метила в почве через год после применения в дозе 4,5 г/га снижали урожай люцерны на 38, картофеля – на 28% [18]. У культурных растений признаки повреждения сульфонилмочевинами проявляются угнетением корневой системы, недоразвитием корневых волосков, покраснением жилок, появлением хлороза, некроза и, в конечном итоге, наступлением полной гибели растений. Описанные проявления последствия сульфонилмочевинных гербицидов могут стать заметными не сразу, что зависит от концентрации гербицида в почвенном растворе [20]. Непреднамеренные превышения норм расхода препаратов, вызванные, например, перекрытием зон опрыскивания при прохождении и разворотах опрыскивателя, могут нанести ощутимый ущерб урожайности последующих чувствительных культур. В связи с этим актуальность разработки технологий снижения остаточных количеств гербицидов с последствием для подготовки почв к посевам чувствительных культур весьма оправдана.

По мнению исследователей, количественные показатели потерь урожая различных культур зависят от персистентности суль-

фонилмочевин в различных условиях [18]. Практикующие специалисты отмечают, что производные сульфонилмочевины существенно различаются по периоду полураспада в почве, длительность которого зависит от таких факторов, как кислотность почвы (чем ниже рН почвенного раствора, тем быстрее происходит деструкция), погодные условия – низкая температура и недостаток влаги тормозят процесс разложения, чем «короче» лето, тем меньше период активной микробиологической деструкции и тем больше вероятность проявления последствия в следующем вегетационном периоде [20, 21]. Особого внимания в этом отношении требуют препараты на основе хлорсульфуруна, метсульфурун-метила, триасульфурона, тритосульфурона и некоторые другие. Министерством сельского хозяйства Китая в 2014 г. было приостановлено применение хлорсульфуруна, классического сульфонилмочевинного гербицида, демонстрирующего высокую эффективность и безопасность на пшенице, но серьёзно угрожающего нормальному росту последующей кукурузы. При этом DT_{50} хлорсульфуруна может составлять 18 месяцев в почвах с низкой микробной активностью и высоким уровнем рН [22].

С другой стороны, есть ряд сульфонилмочевинных гербицидов, которые быстро разлагаются в почве. К таким препаратам относятся трибенурон-метил, тифенсульфурун-метил, трифлусульфурон-метил и другие [20].

На территории Алтайского края специалистами выделено 3 зоны, различающиеся по риску последствия на последующие двудольные культуры. Зона 1 – с высоким риском последствия – степи, где наблюдается систематический недостаток влаги, есть щелочные почвы. Микробиологическая активность почвы низкая. Преобладает нулевая или минимальная обработки, и гербицид остаётся в верхних горизонтах. В случае использования полных дозировок «долгоживущих» сульфонилмочевин риск последствия на подсолнечник превышает 50%. Зона 2 – с умеренным риском последствия. В этой зоне выпадает 400–500 мм осадков, почвы в основном нейтральные. Тепла и влаги обычно достаточно для разложения гербицидов, оставшихся в почве. Риск последствия в этой зоне ниже, около 20–30% (2–3 года из 10). На следующий год после применения сульфонилмочевинных гербицидов не рекомендуется сеять свёклу, овощи. При возделывании других культур (рапс, соя, горох, гречиха, подсолнечник) нужно провести отвальную вспашку.

Гербицид рассредоточивается в пахотном слое, и почва становится менее токсичной. Зона 3 – с низким риском последствия. Это увлажнённая зона с кислыми почвами. В этой зоне риск последствия не более 10% (не чаще 1 раза в 10 лет). Здесь практически нет ограничений по севообороту при применении рекомендованных доз гербицидов. Но и в этой зоне не рекомендуется на следующий год после применения метсульфурун-метила и хлорсульфуруна сеять сахарную свёклу.

Таким образом, большое количество факторов, в том числе слабо контролируемых, но влияющих на величину остаточных концентраций гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин в почвах, а также необходимость соблюдения регламентов их содержания в пищевом сырье и продукции подчёркивают несомненную актуальность поиска эффективных технологий устранения остаточных количеств перед посевом чувствительных культур.

Биодеструкция имидазолинонов и сульфонилмочевин

Почва известна как сложная и динамичная биологическая система, в которой обитает большое разнообразие организмов, выполняющих различные функции. Принимая участие в биогеохимических циклах, они поддерживают многочисленные экосистемные функции почвы [23]. Важнейшим компонентом почвенных биоценозов являются микроорганизмы, обладающие высокой лабильностью ферментных систем и способностью адаптировать их к усвоению органогенов из различных субстратов. Поэтому наиболее важной составляющей процессов разложения гербицидов в почве является деградация почвенной микробиотой [24]. В литературе имеются данные об участии бактерий родов *Methylophila*, *Pseudomonas*, *Ancylobacter*, *Hanschlegelia*, *Klebsiella* и *Rhodococcus* в разложении гербицидов класса сульфонилмочевины, бактерий родов *Arthrobacter*, *Pseudomonas* – имидазолинонов. В связи с нарастающими объёмами применения гербицидов указанных классов подобные исследования приобретают всё большую актуальность и практическую значимость.

В некоторых случаях чрезмерное применение гербицидов негативно сказывается на почвенной микробиоте, влияет на динамику биогеохимических циклов и плодородие почвы. Причина этому – потеря чувствительных

микробных популяций, обеспечивающих специфические экологические функции. Тем не менее, химические структуры гербицидов могут обеспечивать необходимые питательные компоненты для роста микроорганизмов. Дополнительным эффектом чрезмерного использования гербицидов является их воздействие на структуру и состав почвенного микробного сообщества, что оказывает вторичное влияние на питание растений и чувствительность к гербицидам. В значительной степени это связано с воздействием на функции микроорганизмов, участвующих в различных типах взаимодействия с растениями. Гербициды могут влиять на метаболизм растений, изменяя состав экссудатов, используемых для передачи сигналов при взаимодействии растений и микробов [25, 26]. Это было показано на модельном растении *Arabidopsis thaliana* при воздействии гербицида имазетапир. Применение гербицида привело к изменениям в клеточной стенке корня и увеличению производства и эксудации цитрата. Указанные изменения, как предполагается, впоследствии изменили структуру микробного сообщества ризосферных микроорганизмов и изменили морфологию корня. По мнению исследователей, это является фундаментальной причиной для того, чтобы обратить внимание на чрезмерное использование гербицидов в сельском хозяйстве; они могут оказывать токсическое воздействие, которое распространяется по всей пищевой цепи [27].

Структура и способ действия активных ингредиентов, присутствующих в гербицидных препаратах, не являются специфическими для уничтожения сорняков, отчасти из-за большого количества электроотрицательных остатков в их молекулах, включая кислород, гидроксид, сульфонил, фосфорную кислоту, амин и хлор [28]. Микроорганизмы, которые важны для поддержания плодородия почвы, также могут пострадать от окислительного стресса, вызванного электроотрицательностью химических структур, составляющих активные ингредиенты гербицидов. Хотя основное назначение гербицидов – повреждать или уничтожать сорняки-мишени, они могут провоцировать окислительный стресс у различных нецелевых организмов за счёт образования свободных радикалов. Ингибируя метаболические пути в сорняках, активные молекулы гербицидов генерируют активные формы кислорода, тем самым воздействуя на ферменты и в нецелевых организмах.

Более конкретно, основной эффект гербицидов, который изменяет фотосинтетические

системы, может влиять на другие растения, помимо их основных целей, а также воздействовать на фотосинтезирующие цианобактерии. В некоторых ситуациях метаболические промежуточные продукты распада гербицидов могут быть токсичными для нецелевых организмов, возможно, сохраняя электроотрицательные остатки в своих молекулярных структурах [25, 29].

В литературе имеются сведения о проблемах применения отдельных д. в. гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин. Представитель имидазолинонов имазапир – гербицид широкого спектра действия, более устойчив в почвенной среде, чем другие неселективные гербициды, и может бороться с сорняками в течение 5 месяцев. Было доказано, что микробная трансформация является основным механизмом, ответственным за разложение имзапира. За счёт жизнедеятельности микроорганизмов деструкция имзапира в нестерильных почвах может достигать от 62 до 78%. При этом в почве в аэробных условиях имзапир может образовывать второстепенные метаболиты, которые затем в конечном итоге минерализуются. По данным [30] два выделенных из почвы штамма *Pseudomonas fluorescens* и *Bacillus cereus* наиболее эффективно разлагают имзапир в почвенной среде.

Был изучен механизм микробной дегградации имзамокса с участием *Acinetobacter baumannii* IB5. Трансформация гербицида в данном случае происходит путём открытия имидазольного кольца. В результате микробной деструкции образуется продукт 5-гидроксиметил-3-альдегидпиридий, который по сравнению с исходным имзамоксом имеет более простое строение и меньшую токсичность [31, 32].

Многие штаммы бактерий, разлагающих имидазолиноновые гербициды, были выделены из образцов почвы, активного ила очистных сооружений и сточных вод, загрязнённых имидазолиноновыми гербицидами. Почвенные микроорганизмы превращают этот тип гербицидов в слабые полярные метаболиты и, в конечном счёте, в CO_2 . Некоторые исследования показали, что бактериальные ассоциации значительно эффективнее осуществляют дегградацию гербицидов, чем индивидуальные штаммы. Большинство зарегистрированных изолятов способны разрушать один тип имидазолинонового гербицида. Интересно, что *Pseudomonas* sp. ИМ-4 способен разлагать различные имидазолиноновые гербициды. Так, имзапир сначала был превращён в пиазин-

карбоксамид, затем были удалены метильные, карбоксильные и изопропильные группы, и, наконец, имидазолиновое кольцо было разрушено и перегруппировано [33].

Биодеградация гербицидов в почве зависит от условий ОС, которые должны быть благоприятными для развития микробной популяции, ответственной за деградацию. Существует несколько факторов, влияющих на популяцию микроорганизмов-деструкторов – это температура и влажность почвы. Как низкая, так и избыточная влажность почвы может отрицательно сказаться на разложении гербицидов. Реакция имидазолиновых гербицидов на влажность почвы различна. Наиболее эффективное разложение гербицидов происходит в аэробных условиях. Различия во времени разложения гербицидов разными штаммами связаны с разной длительностью лаг-фазы, в течение которой происходит адаптация микроорганизмов и индукция ферментов. Продолжительность лаг-фазы, в свою очередь, может варьировать в зависимости от условий ОС, необходимых для развития деградирующих микроорганизмов, а также от самого гербицида. При быстром увеличении численности популяции микроорганизмов происходит более быстрое разложение гербицидов. Повторное применение одного и того же имидазолинового гербицида или структурно сходной молекулы, как правило, сопровождается его ускоренной биодеструкцией, что связано с адаптацией микроорганизмов к использованию данного соединения в качестве источника углерода [34].

Форма (анионная, нейтральная или катионная) и доступность имидазолиновых гербицидов в почве сильно зависит от pH из-за их амфотерной природы. Они находятся преимущественно в анионной форме при уровнях pH, характерных для многих сельскохозяйственных почв [8].

По мнению авторов [35], деградация имидазолинов в почве не всегда следует простой кинетике первого порядка (экспоненциальное снижение). Часто наблюдается двухфазная деградация, обычно с более быстрой начальной фазой, за которой следует более медленное снижение. В лабораторных исследованиях двухфазная деградация может объясняться снижением микробной активности, например, из-за ограниченных источников питательных веществ или углерода. В полевых исследованиях процессы на поверхности почвы, такие как фотолит или испарение, могут быть ответственны за быстрый начальный

распад, за которым следует более медленное снижение, когда соединение вымывается в более глубокие слои почвы с дождём или поливной водой. Кроме того, подчёркивается, что на скорость деградации влияют сезонные изменения температуры и влажности почвы. Ещё одной причиной двухфазной деградации, которая применима как к лабораторным, так и к полевым исследованиям, является снижение биодоступности, возникающее в результате нелинейной и зависящей от времени сорбции пестицидов. Более того, почва является довольно гетерогенной средой, и в деградации пестицидов участвуют различные микроорганизмы. В различных микрокомпартаментах деградация может происходить с разной скоростью, что в целом приводит к двухфазной или даже многофазной кинетике. Двухфазная деградация может также наблюдаться у хиральных соединений, так как в почве отдельные стереоизомеры зачастую разлагаются с разной скоростью.

Некоторые метаболиты при микробной деградации гербицидов оказываются более токсичными, чем исходные соединения. Данный факт необходимо учитывать при разработке биопрепаратов для ремедиации сельхозугодий. Изучение механизмов биодеградации гербицидов основано на идентификации их метаболитов с помощью современных физико-химических методов структурно-функционального анализа [24]. Подобные исследования сложны, трудоёмки и несомненно представляют и научный, и практический интерес. Так, предложены механизмы деградации метсульфурон-метила и трибенурон-метила [24]. Хромато-масс-спектрометрический анализ позволил идентифицировать по четыре основных метаболита деградации метсульфурон-метила и трибенурон-метила, два из которых – метил-2-(аминосульфонил)-бензоат и 1,2-бензизотиазол-3(2H)он-1,1-диоксид (сахарин) – являются общими для обоих представителей ряда сульфонилмочевин. Исследователи отмечают, что вышеназванные соединения адсорбируются компонентами различных типов почв по-разному, что вероятно, обуславливает разную степень подвижности метаболитов в почвенном горизонте и, следовательно, влияет на точность результатов мониторинговых исследований почв.

К настоящему времени описано несколько путей деградации гербицидов класса сульфонилмочевины и имидазолинов микроорганизмами. Так, двумя группами

исследователей показано, что разложение метсульфурон-метила бактериями происходит путём расщепления сульфонилмочевинного фрагмента. Бактерии *Ancylobacter* sp. продуцируют карбоксилэстеразы и деэтерифицируют метсульфурон-метил, тифенсульфурон-метил, бенсульфурон-метил до менее токсичных соединений. Предложен механизм деградации метсульфурон-метила почвенными бактериями, основными процессами которого являются гидроксирование бензольного кольца, расщепление сульфонилмочевинного фрагмента и деметилирование метилового эфира бензольного кольца [31]. Также был изучен механизм микробной деградации имазамокса с участием *Acinetobacter baumannii* IB5. Трансформация гербицида в данном случае происходит путём открытия имидазольного кольца. В результате микробной деструкции образуется продукт 5-гидроксиметил-3-альдегидпиридин ($C_7H_7NO_2$), который по сравнению с исходным имазамоксом ($C_{15}H_{19}N_3O_4$) имеет более простое строение и меньшую токсичность [31].

Выявлена взаимосвязь между наличием ключевых катаболических генов, ответственных за деградацию пестицидов, и уровнем токсичности набора продуктов биотрансформации гербицидов ряда имидазолинонов, по сравнению с исходными веществами [36]. Установлено, что при обработке семян *Beta vulgaris* супернатантами жидких культур различных штаммов *Rhodococcus*, содержащих продукты микробного распада, а также растворы исходных имазапира и имазамокса, присутствует выраженный фитотоксический эффект. Однако выраженность фитотоксического коррелирует с наличием указанных генов: при их отсутствии подавление роста тест-растения значительно в связи с воздействием остаточных количеств имидазолинонов.

Таким образом, бактерии различных систематических групп могут эффективно трансформировать гербициды в менее токсичные формы и снижать их отрицательное действие на агробиоценозы.

Биоремедиация почв, загрязнённых имидазолинонами и сульфонилмочевинами. Применение биопрепаратов

Обозначенные актуальные проблемы применения гербицидов на основе сульфонилмочевин и имидазолинонов без сомнения требуют адекватных мер по их предупреждению и устранению для поддержания экологической

безопасности и плодородия почв. Наиболее активно используют технологию очистки загрязнённых почв, при которой ряд агротехнических приёмов активизирует деятельность почвенных микроорганизмов. За счёт их жизнедеятельности происходит неспецифическая деструкция загрязнителей. Исследователями предлагается также применение протектантов, сорбентов, антидотов [19].

К новейшим технологиям снижения гербицидной нагрузки на почву относятся биотехнологии, предполагающие применение специально подобранных микроорганизмов-деструкторов и препаратов на их основе. Внесение подобных препаратов может иметь целью снижение гербицидного стресса для культивируемых растений [37] или ремедиацию сельхозугодий, загрязнённых остаточными количествами гербицидов. В первом случае речь идёт о применении РGP-бактерий, устойчивых к действию гербицидов и в их присутствии способных оказывать комплексное положительное воздействие на растение. Отличительной особенностью биоремедиации является применение микроорганизмов-деструкторов пестицидов, экологическая безопасность, высокая специфичность микробной деструкции и отсутствие токсических продуктов разложения [38].

В России практикуется целевая биоремедиация, при которой в загрязнённую почву вносят специально выращенную биомассу микроорганизмов-деструкторов. Для каждого типа загрязнителей используют специальные штаммы микроорганизмов, ранее выделенные из природы и поддерживаемые в лабораторных условиях. Для ремедиации загрязнённых территорий биологические технологии являются наиболее предпочтительными, вследствие своей экологической безопасности, низкой себестоимости работ и достаточно высокой эффективности [39].

При кажущейся простоте решения данной задачи возникает ряд трудностей. Во-первых, необходимо выделить технологичные микроорганизмы, во-вторых – подобрать условия их культивирования, в-третьих – правильно выбрать время, дозу и способ внесения биодеструкторов в почву, так как почва загрязняется неравномерно. Помимо всего перечисленного необходим контроль за интегральной токсичностью почвы, продукты деструкции загрязнителя не должны быть токсичны.

Наиболее эффективным способом поиска микроорганизмов-деструкторов является вы-

деление микробных изолятов из природных почв, длительно обрабатываемых сельскохозяйственными препаратами. Далее проводят селекцию микроорганизмов, способных наиболее активно разлагать в почве целевой поллютант. Важными критериями для селекционного отбора потенциальных биодеструкторов являются: неприхотливость микроорганизмов для культивирования, степень и сроки деструкции загрязнителя, интегральная токсичность почвы до и после микробной биоремедиации, фитотоксичность [40]. Отобранные штаммы микроорганизмов-деструкторов проверяют на безопасность для теплокровных животных. Только после комплекса лабораторных исследований приступают к испытаниям микроорганизмов в полевых условиях. По результатам химических анализов и оценки интегральной токсичности почвы до и после биоремедиации судят об эффективности проведённых работ. Это позволяет гарантировать безопасное применение в ОС микроорганизмов для очистки почв [41].

Многостадийность исследовательского процесса и сложности, возникающие при объективной оценке эффективности действия биопрепаратов, описанные выше, являются вероятно теми причинами, по которым подобные исследования зачастую не заканчиваются внедрением в практику. Имеются лишь единичные публикации о разработанных, сертифицированных и внедрённых биопрепаратах для устранения остаточных количеств сульфонилмочевин и имидазолинонов в почвах.

Белорусскими учёными из Института микробиологии НАН Беларуси разработан микробный препарат комплексного действия «Агроревитол». По данным разработчиков «Агроревитол» на 20–25% повышает всхожесть семян и защищает проростки от негативного воздействия гербицидов и других агрохимикатов; до 20% повышает урожайность сельскохозяйственных культур и улучшает качественные и количественные характеристики получаемой продукции; обогащает почву азотом и фосфором; способствует биоремедиации почвы, снижая остаточные количества гербицидов классов сульфонилмочевин и имидазолинонов в почве на 30%; подавляет развитие патогенной микрофлоры [41].

В состав препарата «Агроревитол» входят штаммы бактерий *Rhodococcus erythropolis* и *Rahnella aquatilis*, обладающие способно-

стью к деструкции гербицидов ряда сульфонилмочевин и имидазолинонов, фосфатмобилизующей и азотфиксирующей активностями, а также спорообразующие бактерии *Bacillus subtilis* с выраженными фитозащитными и ростстимулирующими свойствами. Количество жизнеспособных клеток бактерий в 1 см³ препарата не менее 0,5 млрд [41]. Проведённые полевые испытания подтвердили эффективное воздействие препарата «Агроревитол» на формирование урожая пшеницы яровой и гороха полевого и разложение остаточных количеств гербицидов ряда сульфонилмочевин и имидазолинонов в почве. Применение препарата «Агроревитол» (норма расхода 4 л/га) позволяет получить прибавку урожая 2,2–6,2 ц/га (4,7–12,1%) пшеницы и снизить остаточные количества гербицидов группы имидазолинонов в почве на 5,8–17,9%. При использовании препарата на 40 сут в почве не обнаруживаются гербициды. Следует отметить, однако, что на российском рынке сельхозпрепаратов «Агроревитол» не представлен.

Российскими учёными запатентован штамм бактерий *Rhodococcus qingshengii* Ac-2143 – деструктор гербицида имазетапира и стимулятор роста растений [42]. В ходе экспериментальных исследований установлено, что микроорганизмы данного штамма способны за 7 сут утилизировать 23% имазетапира при культивировании на синтетической питательной среде с содержанием гербицида 50–100 мг/л. При внесении в почву без растений, искусственно загрязнённую гербицидами на основе имазетапира, культуры *R. qingshengii* Ac-2143 деградация д. в. гербицидов достигала 13,1%. При внесении с поливной водой под растения пшеницы степень деградации зафиксирована на уровне 5,7%. Кроме того, доказана способность *R. qingshengii* Ac-2143 продуцировать биологически активные вещества, стимулирующие рост и развитие растений в загрязнённом грунте. Указанные свойства *R. qingshengii* Ac-2143 позволяют применять его в качестве биопрепарата для ремедиации почв, загрязнённых имидазолинонами. Однако сведений о промышленном производстве и применении препарата на основе *R. qingshengii* Ac-2143 не найдено.

Российской компанией ООО «Бионова-тик» запатентован биодеструктор гербицидов «Restart» [43]. Микроорганизмы в составе биопрепарата обладают высокой способностью к биодеструкции химических гербицидов – имазетапир, имазамокс и хлорсульфурино-

вая кислота. Деструкция гербицидных остатков в почве ускоряется в 2–3 раза, что сокращает ограничения для последующих культур в севообороте. Препарат обладает ростостимулирующей активностью. Состав препарата: живые клетки штамма *Rhodococcus erythropolis* (титр не менее $1 \cdot 10^9$ КОЕ/мл), препаративная форма – жидкость. По данным производителя, в зависимости от концентрации остаточных количеств гербицидов в почве, видимый эффект от применения препарата «Restart» проявляется по прошествии 21 сут после первого внесения в почву, стабильный эффект достигается по прошествии 21 сут после второго внесения в почву. Препарат действует в течение всего полевого сезона, при условии отсутствия источников повторного внесения гербицидов. Препарат снимает ограничения по севооборотам, после применения ИМ-подсолнечника и сои, обработанных имидазолинонами и сульфонилмочевинными препаратами. Единственная культура, которую не рекомендовано высевать на следующий год после применения имидазолинонов даже при условии применения препарата «Restart» – это сахарная свёкла. «Restart» доступен к приобретению, стоимость канистры ёмкостью 5 л – около 2 тыс. рублей.

Заключение

Гербициды на основе сульфонилмочевин и имидазолинонов чрезвычайно востребованы современным растениеводством. Эти препараты характеризуются высокой избирательностью, относительно небольшими эффективными дозами, низкой токсичностью для теплокровных животных, умеренной персистентностью в почве. Их применение способствовало снижению общего тоннажа и норм расхода препаратов на 1–2 порядка. Однако в результате применения сульфонилмочевин и имидазолинонов в течение нескольких десятилетий обострилась проблема накопления остаточных количеств в почвах и влияния на чувствительные культуры севооборотов. Как следствие, существенное снижение урожайности из-за фитотоксического последствия, нарушения микробиоценозов и самоочищающей способности почв, невозможность использования сельхозугодий.

Для решения обозначенных проблем идёт активный поиск и разработка агротехнических и биотехнологических приёмов и технологий. На современном этапе развития биотехнологической отрасли перспективна

разработка биопрепаратов на основе активных штаммов-деструкторов остаточных количеств сульфонилмочевин и имидазолинонов. Разработка и внедрение подобных препаратов в технологии защиты растений при применении севооборотов позволит увеличить урожайность, получать экологичную продукцию, сохранять экологическую устойчивость почв и других компонентов биосферы, напрямую и косвенно связанных с ней.

References

1. On the situation on the Russian and world market of fertilizers and crop protection products as of 29.03.2019 [Internet resource] http://www.kaicc.ru/sites/default/files/o_situacii_na_rossiyskom_i_mirovom_rynke_udobreniy_i_szr_na_29.03.2019g.pdf (Accessed: 02.02.2023) (in Russian).
2. Pileggi M., Pileggi S.A.V., Sadowsky M.J. Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities // *Heliyon*. 2022. V. 6. No. 12. Article No. e05767. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05767
3. Kolotova O.V., Mogilevskaya I.V., Nefedyeva E.E., Saneeva E.A. Bacterial degradation of agricultural fungicides // *Adv. of Medical Mycology*. 2022. V. 23. P. 212–217 (in Russian).
4. Kolotova O.V., Mogilevskaya I.V., Nefedieva E.E., Zheltobryukhov V.F. Obtaining effective biodestructors of fungicidal drugs for environmental agrobiocenoses' maintenance sustainability // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. V. 984. Article No. 032082. doi: 10.1088/1755-1315/984/3/032082
5. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V., Berezin G.I. Reaction of soil microbiota to pesticide action (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 3. P. 4–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-004-018
6. Larina G.E., Spiridonov Yu.Ya., Shestakov V.G. The effect of physicochemical properties and the hydrothermal regime of soil on the detoxification of imidazolinone herbicides // *Agrochemistry*. 2003. No. 11. P. 78–84 (in Russian).
7. Kulikova N.A., Lebedeva G.F. Herbicides and ecological aspects of their application. Moskva: Librocom, 2010. 150 p. (in Russian).
8. Marinho M.I.C., Costa A.I.G., Vieira N.M., Paiva M.C.G., Freitas F.C.L., Silva A.A. Validation and application of a QuEChERS based method for estimation of half-life of imidazolinone herbicides in soils by LC-ESI-MS/MS // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. V. 167. P. 212–217. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.075
9. Aichele T.M., Penner D. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil // *Weed Technology*. 2005. V. 19. No. 1. P. 154–159. doi: 10.1614/WT-04-057R
10. Koutros S., Silverman D.T., Alavanja M.C., Andreotti G., Lerro C.C., Heltshe S., Lynch C.F., Sandler D.P.,

- Blair A., Beane Freeman L.E. Occupational exposure to pesticides and bladder cancer risk // *International Journal of Epidemiology*. 2016. V. 45. No. 3. P. 792–805. doi: 10.1093/ije/dyv195
11. Golombieski J.I., Sutili F.J., Salbego J., Seben D., Gressler L.T., da Cunha J.A., Gressler L.T., Zanella R., Vaucher Rde A., Marchesan E., Baldissotto B. Imazapyr+imazapic herbicide determines acute toxicity in silver catfish *Rhamdia quelen* // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. V. 128. P. 91–99. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.010
12. Morokhovets V.N., Basay Z.V., Morokhovets T.V., Shterbolova T.V. Study of sensitivity of crops to soil residues of herbicides Pivot, Fabian, Lazurit and Proponit // *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2019. No. 3. P. 73–78 (in Russian). doi: 10.25808/08697698.2019.205.3.013
13. Ladan S.S. Phytotoxic follow-up imidazolinone on green manure and ways to reduce it // *Plodorodie*. 2021. No. 6. P. 78–83 (in Russian). doi:10.25680/S19948603.2021.123.22
14. Larina G.E. Structuring and analysis of information of ecotoxicological monitoring of herbicides // *Modern problems of science and education*. 2007. No. 12-4. P. 156–157 (in Russian).
15. Larina G.E., Spiridonov Yu.Ya., Zakharov S.A., Zakharova T.V. Estimation and prediction of phytotoxicity of sulfonylurea and imidazolinone herbicides // *Agrochemistry*. 2004. No. 4. P. 22–32 (in Russian).
16. Lukyanuk N.A. Regulation of herbicides application aftereffect with agricultural techniques in the link of beet crop rotation // *Arable Farming and Plant Breeding in Belarus*. 2020. No. 56. P. 28–39 (in Russian).
17. Stetsov G.Y. Aftereffects of herbicides in Western Siberia // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2015. No. 3. P. 17–19 (in Russian).
18. Chkanikov N.D., Spiridonov Y.Y., Khalikov S.S., Muzafarov A.M. Antidotes for reduction of phytotoxicity of the residues of sulfonylurea herbicides // *INEOS Open*. 2019. V. 2. No. 5. P. 145–152 (in Russian). doi: 10.32931/io1921r
19. Spiridonov Yu.Ya. To the question on the after-effects of sulfonylurea herbicides in soils of the Russian Federation and ways to reduce their negative effect on cultivated plants // *Vestnik zashchity rasteniy*. 2009. No. 3. P. 10–19 (in Russian).
20. Variety of sulfonylurea herbicides and their after-effects in crop rotation [Internet resource] <https://www.agroxxi.ru/zrast/200804kk/200804kk.pdf> (Accessed: 11.10.2023) (in Russian).
21. Yavari S., Sapari N.B., Malakahmad A., Yavari S. Degradation of imazapic and imazapyr herbicides in the presence of optimized oil palm empty fruit bunch and rice husk biochars in soil // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. V. 366. P. 636–642. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.022
22. Wu L., Gu Y.C., Li Y.H., Zhou S., Wang Z.W., Li Z.M. Synthesis, herbicidal activity, crop safety and soil degradation of pyrimidine- and triazine-substituted chlorsulfuron derivatives // *Molecules*. 2022. V. 27. No. 7. Article No. 2362. doi: 10.3390/molecules27072362
23. Thiour-Mauprivez C., Martin-Laurent F., Calvayrac C., Barthelmebs L. Effects of herbicide on non-target microorganisms: towards a new class of biomarkers? // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 684. P. 314–325. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.230
24. Leontev V.N., Akhramovich T.I., Ignatovets O.S., Lazovskaya O.I. Natural ways of the herbicide sulfonylurea degradation // *Proceedings of BSTU. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology*. 2013. No. 4. P. 197–204 (in Russian).
25. Elias D., Bernot M.J. Effects of atrazine, metolachlor, carbaryl and chlorothalonil on benthic microbes and their nutrient dynamics // *PLoS One*. 2014. V. 9. No. 10. Article No. e109190. doi: 10.1371/journal.pone.0109190
26. Liwarska-Bizukoje E., Maton C., Stevens C.V. Biodegradation of imidazolium ionic liquids by activated sludge microorganisms // *Biodegradation*. 2015. V. 26. P. 453–463. doi: 10.1007/s10532-015-9747-0
27. Qian H., Lu H., Ding H., Lavoie M., Li Y., Liu W., Fu Z. Analyzing *Arabidopsis thaliana* root proteome provides insights into the molecular bases of enantioselective imazethapyr toxicity // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Article No. 11975. doi: 10.1038/srep11975
28. Griboff J., Morales D., Bertrand L., Bonansea R.I., Monferrán M.V., Asis R., Wunderlin D.A., Amé M.V. Oxidative stress response induced by atrazine in *Palaemonetes argentinus*: the protective effect of vitamin E // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. V. 108. P. 1–8. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.06.025
29. Dong W., Chen Q., Hou Y., Li S., Zhuang K., Huang F., Zhou J., Li Z., Wang J., Fu L., Zhang Z., Huang Y., Wang F., Cui Z. Metabolic pathway involved in 2-methyl-6-ethylaniline degradation by *Sphingobium* sp. strain MEA3-1 and cloning of the novel flavin-dependent monooxygenase system *meaBA* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2015. V. 81. No. 24. P. 8254–8264. doi: 10.1128/AEM.01883-15
30. Wang X., Wang H., Fan D. Degradation and metabolism of imazapyr in soils under aerobic and anaerobic conditions // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2006. V. 86. No. 8. P. 541–551. doi: 10.1080/03067310500410730
31. Orlovskaya P.I., Mandryk-Litvinkovich M.N., Girilovich N.I., Stepanova T.L., Evdokimova O.V., Kalamiyets E.I. Bacteria-degraders of sulfonylurea and imidazolinone herbicides // *Microbial Biotechnology: fundamental and applied aspects: collection of scientific papers*. Minsk: Publishing House “Belarusian Science”, 2019. P. 549–560 (in Russian).
32. Liu C., Yang X., Lai Y., Lu H., Zeng W., Geng G., Yang F. Imazamox microbial degradation by common

clinical bacteria: *Acinetobacter baumannii* IB5 isolated from black soil in China shows high potency // Journal of Integrative Agriculture. 2016. V. 15. No. 8. P. 1798–1807. doi: 10.1016/S2095-3119(16)61344-8

33. Huang X., He J., Yan X., Hong Q., Chen K., He Q., Zhang L., Liu X., Chuang S., Li S., Jiang J. Microbial catabolism of chemical herbicides: microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes // Pesticide Biochemistry and Physiology. 2017. V. 143. P. 272–297. doi: 10.1016/j.pestbp.2016.11.010

34. Bundt A.C., Avila L.A., Pivetta A., Agostinetto D., Dick D.P., Burauel P. Imidazolinone degradation in soil in response to application history // Planta Daninha. 2015. V. 38. No. 2. P. 341–349. doi: 10.1590/0100-83582015000200020

35. Buerge I.J., Bächli A., Kasteel R., Portmann R., López-Cabeza R., Schwab L.F., Poiger T. Behavior of the chiral herbicide imazamox in soils: pH-dependent, enantioselective degradation, formation and degradation of several chiral metabolites // Environmental Science and Technology. 2019. V. 53. No. 10. P. 5725–5732. doi: 10.1021/acs.est.8b07209

36. Kruglova M.N., Chugunova Y.A., Samkov A.A., Volchenko N.N., Khudokormov A.A. Correlation between the diversity of xenobiotic catabolism genes in *Rhodococcus* and phytotoxicity of products of biotransformation of imidazolinones and organophosphorus herbicides // Plants and microbes: the future of biotechnology: abstract book of the 2nd International Scientific Conference PLAMIC2020. Saratov: Association “Agrarian Education and Science”, 2020. P. 131–132 (in Russian).

37. Bakaeva M.D., Chetverikov S.P., Chetverikova D.V., Kendzhieva A.A. Promising microorganisms for coping

herbicide stress in plants // Plants and microbes: the future of biotechnology: abstract book of the 2nd International Scientific Conference PLAMIC2020. Saratov: Association “Agrarian Education and Science”, 2020. P. 32 (in Russian). doi: 10.28983/PLAMIC2020.032

38. Lazykin A.G., Leshchenko A.A., Ashikhmina T.Ya., Pogorelsky I.P., Darmov I.V., Lundovskikh I.A., Ustyuzhanin I.A., Sharov S.A. Assessment of the possibility of using plant-microbial associations in biotechnology of soil remediation at the facility “Maradykovskiy” // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 4. P. 96–104 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-4-096-104

39. Zharikov G.A., Marchenko A.I., Kraynova O.A., Kapranov V.V., Zharikov M.G. Development and field trials of the technology for bioremediation of the territories contaminated by toxic chemicals // Extreme Medicine. 2013. No. 2. P. 41–51 (in Russian).

40. Kuznetsov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V., Engelhar Mt. Applied ecobiotechnology. Moskva: Laboratoriya znaniy, 2015. 1164 p. (in Russian).

41. Kalamiyets E.I. Microbial biotechnologies as a base of ecologization and enhancement of productivity of agricultural production // Microbial Biotechnology: fundamental and applied aspects: collection of scientific papers. Minsk: Publishing House “Belarusian Science”, 2018. P. 3–11 (in Russian).

42. Muratova A.Y., Turkovskaya O.V. Strain of bacteria *Rhodococcus qingshengii* Ac-2143 – destructor of imazethapyr herbicide and stimulator of plant growth // RU 2 764 119 C1. Application: 2020139179, 27.11.2020. Publication date: 13.01.2022. Bull. 2 (in Russian).

43. Restart – biodegradable [Internet resource] <https://bionovatic.ru/catalog/restart> (Accessed: 02.02.2023).