

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ МУЛЬЧИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА: ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

¹А.Х.-Х. Нугманов, доктор технических наук, профессор

²Л.М. Титова, кандидат сельскохозяйственных наук

¹И.А. Бакин, доктор технических наук, профессор

¹А.В. Журавлев, доктор технических наук, профессор

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

²Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

E-mail: bakin@rgau-msha.ru

Ключевые слова: мульча, биоразлагаемость, биоразлагаемые пленки, биополимеры, пленочные полимерные покрытия.

Реферат. Мульчирование почвы является распространенным агротехническим приемом в сельском хозяйстве, обеспечивающим снижение потерь влаги, подавление сорняков, регулирование температуры почвы и в целом повышение урожайности. Традиционно для этих целей используется полиэтилен низкой плотности, что обусловлено его механическими и барьерными свойствами, устойчивостью ко всем формам деградации, простотой обработки покровной почвы и низкой стоимостью. Однако использование полиэтилена имеет ряд техногенных и экологических рисков, связанных с затрудненной биоразлагаемостью, сложностью его удаления после цикла сбора урожая и окончательной утилизации. Поэтому существует большой интерес к использованию биоразлагаемых мульчирующих пленок. Рассмотрены две группы материалов, наиболее пригодных для производства биоразлагаемых покрытий: полисахариды естественного происхождения и биополимеры синтетического происхождения. Проанализированы технологические приемы получения биополимеров из необработанного природного материала путем экстракции из биомассы, а также химическими или биотехнологическими методами. Представлены данные о потенциале биоразлагаемых мульчирующих материалов естественного происхождения, пленок на основе полисахаридов, синтетических полимеров, а также наносимых в виде раствора для возможной замены традиционных мульчирующих материалов. Проведено сравнение составов биоразлагаемых покрытий, их свойств и эффектов при использовании. Обобщены перспективы и пути внедрения биоразлагаемых пленочных материалов в практику сельского хозяйства.

BIODEGRADABLE MULCHING MATERIALS FOR AGRICULTURE: TECHNOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY

¹A.H.-H. Nugmanov, Doctor of Technical Sciences, Professor

²L.M. Titova, PhD in Agricultural Sciences

¹I.A. Bakin, Doctor of Technical Sciences, Professor

¹A.V. Zhuravlev, Doctor of Technical Sciences, Professor

¹Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Moscow, Russia

²Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

E-mail: bakin@rgau-msha.ru

Keywords: mulch, biodegradability, biodegradable films, biopolymers, film polymer coatings.

Abstract. Soil mulching is a common agricultural technique that reduces moisture loss, suppresses weeds, regulates soil temperature, and generally increases yield. Traditionally, low-density polyethylene is used for these purposes due to its mechanical and barrier properties, resistance to all forms of degradation, simple processing of cover soil, and low cost. However, using polyethylene has several artificial and environmental risks associated with difficult biodegradability, the difficulty of its removal after the harvest cycle, and final disposal. Therefore, there is great interest in the use of biodegradable mulch films. Two groups of materials most suitable for producing biodegradable coatings are polysaccharides of natural origin and biopolymers of synthetic origin. Technological methods for producing biopolymers from raw natural material by extraction from biomass and chemical or

biotechnological methods are analyzed. Data are presented on the potential of biodegradable mulch materials of natural origin, films based on polysaccharides, synthetic polymers, and those applied as a solution for possible replacement of traditional mulch materials. A comparison was made of the compositions of biodegradable coatings, their properties, and their effects when used. The prospects and ways of introducing biodegradable film materials into agricultural practice are summarized.

Мульчирование почвы – это агротехнический прием в сельском хозяйстве, обеспечивающий снижение потерь влаги, подавление сорняков [1], регулирование температуры почвы [2] и предотвращение эрозии почвы [3]. Эффект мульчирующих пленок заключается во влиянии на агрофизические и микробиологические свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур [4]. Их использование приводит к снижению химической нагрузки на почву за счет сокращения применения химических средств борьбы с сорняками, уменьшению потребления воды и ускорению сбора урожая. Мульчирование может также оказывать положительное влияние на качество урожая за счет сохранения растений и плодов от воздействия болезней почвы и загрязнения.

Биоразложение мульчи – это процесс биофизической, биохимической и ферментативной природы, осуществляемый в естественных условиях посредством микробного сообщества почвы, конечным результатом которого является полное превращение органического вещества в неорганические продукты (например, диоксид углерода и вода). Биоразложение может происходить как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Продукты разложения безопасны для окружающей среды, потому что использование такого типа мульчи не создает критичной антропогенной нагрузки.

В настоящее время на рынке представлен значительный ассортимент мульчирующих материалов, в научном сообществе проведены исследования свойств, технологий, агротехнических эффектов и экологических аспектов применения различных типов мульчи в зависимости от климатических условий в разных частях мира и для различных видов растений. Однако систематических исследований по применению биоразлагаемой мульчирующей пленки практически нет [5]. Изучение возможности использования биоразлагаемых мульчирующих материалов во многом связано с вопросами устойчивого развития агропромышленного ком-

плекса, производством органической продукции, возрастающими запросами экологической безопасности при повсеместном использовании полимерных мульчирующих материалов на основе полиэтилена, поэтому является весьма актуальным.

Цель исследований заключалась в систематизации имеющихся данных и качественном анализе мировых исследований и тенденций в области применения биоразлагаемых мульчирующих материалов в России и на глобальных рынках сельскохозяйственной и садоводческой продукции.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы методы сравнительного анализа при проведении критического обзора мировых и отечественных публикаций научной и патентной литературы по поставленной цели. В качестве источников данных использовались наукометрические и патентные базы: библиографическая и реферативная база данных рецензируемой научной литературы Scopus, научная электронная библиотека eLibrary.Ru, российская научная электронная библиотека КиберЛенинка, крупнейшая академическая социальная сеть ResearchGate, информационно-поисковая система Федерального института промышленной собственности, интернет-сервис всемирного поиска патентных документов Esp@cenet.

Задачами исследования являлись: выявление основных тенденций, достижений, проблем и дальнейших ориентиров, перспектив развития биоразлагаемых мульчирующих материалов в сельском хозяйстве; критический анализ и систематизация сведений по поводу неблагоприятного воздействия пленок для мульчирования на устойчивость агроэкосистем; оценка вариантов использования биоразлагаемой и полиэтиленовой пленки с экологической точки зрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В период с 2021 г. наблюдается увеличение объемов производства биоразлагаемых мульчирующих пленок на 8,5 % [5]. В современной агротехнологии подавление сорняков происходит при использовании светонепроницаемых мульчирующих материалов, хотя для мульчирования с успехом используют и прозрачные материалы, если требуется нагрев почвы за счет солнечной радиации [6], но в этом случае мульчирующие пленки могут стимулировать рост сорняков. Прозрачные мульчирующие пленки также используются для частичной стерилизации почвы при воздействии солнечной радиации в течение 4–6 недель в самый жаркий период года на отдыхающую почву, что позволяет нагревать верхние слои почвы до температур, смертельных для широкого спектра почвенных патогенов [7].

При выборе мульчирующего материала исходят из пропускной способности (коэффициента пропускания) в различных диапазонах длин волн. При этом значения в диапазоне видимого света влияют на способность мульчи подавлять рост сорняков, в инфракрасном диапазоне – влиять на температуру почвы. Влияние это может быть как положительным, так и отрицательным. Увеличение температуры почвы в корневой зоне оказывает положительное влияние на рост растений, повышая созревание урожая в случае недостаточной температуры окружающего воздуха, но может вызывать и локальный перегрев близко прилегающей к поверхности корневой системы. Как радиометрическое свойство мульчирующей пленки может быть оценена также отражательная способность.

С 1940-х гг. прошлого века мульчирование производят преимущественно с помощью полиэтилена низкой плотности и стирола. Пленки подвергаются сильным механическим нагрузкам с растягивающими упругими деформациями во время укладки и эксплуатации в полевых условиях, а также процессам старения из-за воздействия климатических факторов, таких как ветер, суточные и сезонные колебания температуры, солнечная радиация и осадки [8]. Механические характеристики играют фунда-

ментальную роль для мульчирующих пленок, поскольку они определяют их долговечность и практичность. Свойства обычных полиолефиновых пленок, такие как их механические и оптические характеристики, химическая стойкость, устойчивость к фоторазрушению и микробиологическому разложению, а также простота их обработки и низкая стоимость являются причиной широкого распространения и использования этих пленок во всем мире. Согласно исследованию Н. Sintim, М. Flyru [9], мировой рынок сельскохозяйственной пластиковой пленки будет расширяться с совокупным годовым темпом роста на 7,4% с 2018 по 2026 г.

Технические требования к мульчирующим пленкам из полиэтилена приведены в ГОСТ 10354-82 [10]. Основные регламентируемые показатели, определяющие эксплуатационные характеристики: прочность при растяжении в продольном и поперечном направлении, относительное удлинение при разрыве. Что касается требований к биоразлагаемым мульчирующим материалам, стандарты на данный момент не разработаны.

На рынке представлены мульчирующие пленки в различных цветовых исполнениях, например, зеленые, красные и др., для уничтожения насекомых или для стимулирования фотосинтеза. Полиэтиленовая мульчирующая пленка может быть изготовлена многослойной и различных цветов, технология ее изготовления отработана и устойчива. При этом полиэтилен является тонким, хрупким, стабилен и обладает продолжительным периодом разложения в почве, не разлагается биологически даже в естественной среде, поэтому мульчирующие пленки необходимо восстанавливать после использования. Рециклизация мульчирующих пленок на основе полиэтилена возможна, но после сезона эксплуатации их необходимо собирать, сортировать и подвергать очистке от почвы, что трудоемко. Кроме того, физически изношенную и грязную мульчирующую пленку трудно использовать повторно. Для облегчения сбора полимерной пленки в ее состав предлагается добавлять ферромагнетик и сбор осуществлять с помощью ленточного транспортера с мягкомагнитным материалом [11].

Технические приемы для ускорения биоразложения полимерной мульчи. Для ускорения деструкции мульчирующие пленки изготавливаются из нефтехимических полимеров, таких как полиэтилен или полистирол, с добавлением химического агента разложения. Например, биоразлагаемость мульчирующих пленок на основе термопластичной полимерной матрицы обеспечивается за счет введения целлюлозосодержащего наполнителя [12] на основе целлюлозы или лигнинцеллюлозы, не представляющей пищевой и кормовой ценности (костра льна, лузга подсолнечника или риса, листва, солома) в количестве от 10 до 40%. Для получения толщины пленки от 40 до 400 мкм наполнитель необходимо механически измельчать и просеивать на сите с ячейей 300 мкм, затем подсушивать в течение 3 ч при 105 °С, что энергоемко. Биоразлагаемый наполнитель отрицательно влияет на механические свойства, увеличивая жесткость, даже в таких относительно небольших концентрациях.

Для придания свойства биоразлагаемости мульчирующей пленке в качестве добавки используют крахмал. Содержание крахмала в мульчирующих пленках составляет до 40%, и он выполняет функцию структурообразователя. Известна биоразлагаемая мульча из смеси двух поддающихся биохимическому разложению биоразлагаемых полимеров, включающая картофельный крахмал, саженаполненный каучук и биоразлагаемые рециклизованные полимеры. Мульча разлагается за короткий промежуток времени в зависимости от толщины (от 3 месяцев до года), превращаясь в поддающийся биохимическому разложению материал, обогащающий почву [13]. Получаемая пленка хрупкая и сильно подвержена влиянию влаги. Большие количества пластификаторов, таких как глицерин и этиленгликоль, – эффективная мера для снижения хрупкости, но получаемые пленки слишком липкие и мягкие, непрочные во влажном состоянии. Это вызывает технологические трудности при формировании полотна пленки.

Высокие концентрации крахмала – недостаток с точки зрения цены получаемой пленки. Кроме того, мульчирующие пленки на основе крахмала обладают недостаточной механической прочностью. Для устранения этого недо-

статка используют многослойные пленки. Это приводит к усложнению технологии изготовления и удорожанию из-за многокомпонентности состава. При достаточной механической прочности сроки разложения мульчи для быстрозревающих культур с однократным урожаем за сезон (редис, салат, томаты и др.) должны быть минимальны (не более 3–4 месяцев), чтобы не мешать подготовке почвы и посеву новой культуры.

Мульчирующие пленки на основе термопластичной матрицы не являются биоразлагаемыми в полном смысле. При постоянном увеличении количества мульчирующей пленки в почве остается все больше остаточной пленки, которая оказывает серьезное негативное влияние на сельское хозяйство (ухудшение качества пахотных земель, снижение урожайности, затруднение сельскохозяйственных операций и вторичное загрязнение окружающей среды). При засеве пахотных земель многократно за сезон наличие большого количества остаточной пленки в почве вызывает частые отказы оборудования, прерывистую механическую работу, серьезно страдает качество и эффективность. Использование пластиковых материалов приводит к серьезному недостатку, заключающемуся в утилизации огромного количества отходов, и в последние десятилетия осознание экологических проблем побуждает к разработке нового поколения материалов, созданных из сырья возобновляемого происхождения. Полностью биоразлагаемая мульчирующая пленка – один из эффективных способов решения экологических проблем, вызванных мульчирующей пленкой на основе термопластичной матрицы.

Полностью биоразлагаемые мульчирующие покрытия. Отказ от технологий выращивания, основанных на рыхлении почвы, и переход к природоподобным – мировая тенденция [14]. Наиболее простой способ защитить почву от потери влаги и солнечного воздействия – покрыть ее слоем волокнистого материала растительного происхождения [15–18], например, отходами после сбора и шелушения зерна, круп и др. Такая технология с переменным успехом применяется на территориях с различным климатом. Некоторые результаты приведены ниже.

Мульчирование растений томата рисовой шелухой благоприятно сказалось на урожайности и качестве продукции в сравнении с контролем [19] при проведении полевых испытаний в засушливом климате Республики Калмыкия.

В работе J. Hu et al. [20] произведен сравнительный анализ влияния на микроклимат, содержание антоцианов и содержание сахаров в плодах столового винограда Синьей в ползасушливом климате черного геотекстиля и травяной мульчи. В качестве контроля использовалась поверхностная обработка почвы без мульчирующих покрытий. Черный геотекстильный мульчирующий материал увеличивал температуру воздуха и почвы, в то время как травяная мульча уменьшала их. Протестированные в исследовании виды мульчи не оказали большого влияния на содержание витамина С и на выход готовой продукции. Однако оба увеличили общее содержание антоцианов на 36,04% (геотекстиль) и 5,03% (травяная мульча) сравнению с контролем. Влияние на содержание сахаров черного геотекстиля было отрицательным, в то время как травяная мульча увеличивала их количество по сравнению с контролем. Эти данные свидетельствуют о том, что травяная мульча является предпочтительной при выращивании винограда в районе Турфана республики Китай.

Степень сохранности почвенной влаги зависит не только от возможности мульчирующего материала препятствовать воздушным потерям влаги, но и от его способности отражать солнечный свет [21]. Мульчирование мелкодисперсным мелом междурядий по сравнению с черно-серебристой пленкой оказалось менее эффективным.

О.В. Якимова, В.Э. Лазько [22] сравнили эффективность применения мульчирования почвы полимерной биоразлагаемой пленкой фирмы BASF и вторичной целлюлозой на посевах дыни. Результат исследования показал, что мульчирование в обоих случаях защищает корневую систему от перегрева и сглаживает колебания температуры в почве, препятствует испарению влаги и подавляет рост сорняков, но именно применение вторичной целлюлозы создало оптимальные условия для корневой системы дыни. После завершения уборки и удаления капельной ленты вторичная целлюлоза

и полимерная пленка не создавали препятствий для применения механизированной обработки почвы.

В работе К.С. Розметова [23] изучалось влияние мульчирования поверхности почвы навозом-сыпцом на влажность и плотность почвенной корки. Исследования показали, что это способствует заметному увеличению влажности почвы в слое расположения семян хлопчатника, образование почвенной корки значительно сократилось.

Описана мульчирующая композиция на основе торфяного материала [24]. Способ ее получения включает объединение волокнистого торфяного материала с водой и последующее вмешивание полученного из биомассы пиролизного масла в суспензию. Мульчирующая композиция в форме поверхностного покровного слоя распределяется по почвенному субстрату в качестве пестицида для борьбы с сорняками и вредителями, а также с целью рекультивации и улучшения почвы.

Биоразлагаемые мульчирующие материалы типа пленок. Для производства мульчирующих покрытий – аналогов пленочных полимерных покрытий на основе полиэтилена и полистирола – используют две группы материалов: полисахариды естественного происхождения и биополимеры синтетического происхождения. Биополимеры могут быть получены путем экстракции из биомассы, а также химическими или биотехнологическими методами из необработанного природного материала.

Пленочные материалы на основе полисахаридов давно известны и активно разрабатываются в пищевой промышленности в качестве биоразлагаемой упаковки, предотвращающей порчу и потерю влаги, изменение цвета при хранении свежих фруктов и сухофруктов [25] и для других целей [26]. Широкое внедрение их в производство сдерживается низкими эксплуатационными свойствами (низкая механическая прочность, набухание при воздействии влаги) и высокой ценой по сравнению с полиэтиленом [27]. Но большинство разработок в мире как раз направлено на создание мульчирующих покрытий на основе полисахаридов [28]. В последние годы биоразлагаемые пленки были разрабо-

таны для сельскохозяйственных целей [29] на основе крахмала [30–32], целлюлозы [33–35], хитозана [36], альгината натрия [37] и других минералов [38]. Состав композиций пленок для мульчирования во многом аналогичен упаковочным пленкам для пищевой промышленности, и проблемы для сельского хозяйства имеются те же: высокая стоимость, низкие эксплуатационные показатели и барьерные свойства, так как в процессе эксплуатации мульча подвергается воздействию влаги и солнечного излучения.

Малоизученность свойств биоразлагаемых мульчирующих пленок, механизмов повышения их эксплуатационных показателей, слабая аргументация достоинств в широком диапазоне условий использования и высокая стоимость являются основными коммерческими ограничениями для внедрения таких пленок в системы растениеводства в полевых условиях. Ниже приведен критический анализ некоторых имеющихся данных об эффективности использования биоразлагаемых мульчирующих материалов.

Эффекты от использования биоразлагаемых полимерных материалов, естественно, не должны ограничиваться только их высокой скоростью деструкции. У мульчи есть определенные функции с точки зрения ее влияния на показатели почвы и сельскохозяйственные культуры (индекс роста зеленой массы, урожайность, влияние на цвет плодов, содержание сахаров, антоцианов, кислот и другие качества, определяющие их покупательский спрос). В литературе оцениваются самые разные показатели и по различным методикам, поэтому сложно бывает сопоставить отдельные результаты друг с другом. Согласно опубликованным данным, в целом наблюдается положительное влияние на качество почвы и сельхозпродукции при использовании биоразлагаемых мульчирующих материалов, но практически во всех источниках авторы делают оговорку на эдафические особенности почв и климат в исследуемом регионе. Ниже приведем некоторые из них.

Наибольшее количество работ посвящено исследованию мульчирующих пленок на основе крахмала, т.к. это самый дешевый полисахарид естественного происхождения и его можно получать как побочный продукт различных производств (например, из картофельной ко-

журы, банановых корок, отходов переработки кукурузы [8]).

Промышленно производимые полностью биоразлагаемые мульчирующие пленки на основе биополимеров синтетического происхождения включают полигликолевую кислоту (PGA), полимолочную кислоту (PLA), бутилентеревалат (PBAT), полибутиленсукцинат (PBS), полибутиленсукцинат-адипат-бутиленгликоль (PBSA), сополимер полибутиленсукцинат-бутилентеревалат (PBST), поликапролактон (PCL), сложные эфиры жирных кислот (PHA), пропиленкарбонат (PPC) по отдельности или в сочетании друг с другом.

При использовании чистого PBAT [39] для изготовления мульчирующей пленки ее барьерные свойства (например, значительная скорость пропускания водяного пара) не соответствуют условиям роста и развития большинства сельскохозяйственных культур.

Известны композиции на основе полимолочной кислоты PLA для изготовления полностью биоразлагаемой мульчирующей пленки [40]. Такие пленки прозрачны и относительно выгодны с точки зрения стоимости, но им не хватает гибкости и ударопрочности. Кроме того, паропроницаемость таких пленок значительна, что приводит к быстрому высыханию мульчированной почвы. Обеспечить высокую атмосферостойкость и барьерные свойства при одновременном усилении прочностных свойств возможно при изготовлении мульчирующей пленки из нескольких различных по составу слоев [41]. К недостаткам пленки для мульчирования относятся сложность состава, многостадийность обработки при послойном ее создании, высокая стоимость.

Мульчирующие пленки тройных смесей (PBAT, PLA и PPC) успешно получают путем экструзионного смешивания и выдувания пленки. Исследовано влияние различных коэффициентов раздува на механическую прочность пленок: состава PBAT – 64 масс. %, PPC – 20 масс. %, PLA – 16 масс. % [42]. Мульчирующая пленка обладает хорошими механическими свойствами: прочность на растяжение в продольном/поперечном направлении достигает соответственно 43,0 / 37,6 МПа, относительное удлинение при разрыве – 160/450%. Добавление PLA улучшает прочность мульчирующей

пленки, а добавление РРС – барьерные характеристики. После добавления высокоэффективных светостабилизаторов мульчирующие пленки обладают хорошей светостойкостью, их удлинение при разрыве превышает 100% после 100 ч УФ-облучения.

Кроме технологических проблем производства биоразлагаемых материалов для мульчирования существует проблема оценки экологической безопасности при их агротехническом применении. В исследовании Sh. Zhang et al. [43] приведены результаты оценки влияния мульчи, биоразлагаемой мульчирующей пленки и полиэтиленовой пленки на физические, химические и биологические свойства почвы после 6 лет (2013–2019 гг.) мульчирования при выращивании чеснока. Результаты показали, что насыпная плотность почвы 10–20-сантиметрового слоя почвы под биоразлагаемым пленочным материалом снизилась на 12,09–17,17% по сравнению с полиэтиленовой пленкой. Общее содержание азота в почве увеличилось на 14,75–28,37, а фосфора и калия – на 64,20 и 108,82% соответственно. Кроме того, биоразлагаемая мульчирующая пленка повысила активность микробов, почвенной уреазы и каталазы почвы, т. е. можно утверждать, что биоразлагаемая мульчирующая пленка может улучшить качество почвы.

С целью опытно обоснованного рационального выбора показателей почвы, которые нужно контролировать для оценки влияния на нее биоразлагаемых мульчирующих покрытий, в ходе 18-месячного исследования [44] определялось воздействие на пять показателей почвы мульчирования тремя видами биоразлагаемой мульчи (на основе крахмала, полимолочной кислоты и целлюлозы) при посадке томатов в закрытом и в открытом грунте в трех географически различных местах на территории США. Было установлено, что из пяти оцененных показателей наиболее чувствительными к виду мульчи стали активность микробной биомассы почвы и β -глюкозидаза, и их контроль рекомендуется в качестве показателей при оценке влияния биоразлагаемой мульчи.

В работе X. Zhang et al. [45] приведены результаты исследования влияния на свойства почвы (температура, влажность, pH, электропроводность, питательные вещества и фермен-

ты), рост растений (морфология корней, относительная скорость роста, биомасса растений и соотношение корень/побег), урожайность и качество плодов различных видов мульчи (пленка из полиэтилена, два вида биоразлагаемой пленки: биоразлагаемая бумага из растительной соломы и пленка, изготовленная из растительной соломы в сочетании с разложившимся углем). Немulьчирующая почва служила контролем. Испытание проводилось в теплице с томатами, расположенной в округе Хелань, Китай, со средней температурой воздуха около 32 °C и 31 °C в течение летнего сезона в 2016 и 2017 гг. соответственно. Мульчирование полиэтиленом хотя и увеличивало влажность почвы, оно повышало температуру почвы, pH и электропроводность и уменьшало содержание доступного фосфора, что приводило к замедлению роста растений (длины и диаметра корней, высоты растений и площади листьев, а также прироста биомассы побегов и корней) и снижению урожайности плодов. Мульчирование биоразлагаемой пленкой снижало температуру почвы, однако приводило к уменьшению роста корней (диаметр корней и биомасса, а также соотношение корень/побег). Мульчирование биоразлагаемой бумагой не только снижало температуру почвы, но и увеличивало её влажность. В результате этот вид мульчи продемонстрировал ряд преимуществ, таких как снижение электропроводности почвы, увеличение активности почвенных ферментов, улучшение роста растений и повышение урожайности.

В работе A. Sekara et al. [46] представлены результаты исследований, проведенных на юге Италии, целью которых была оценка влияния биоразлагаемой мульчи на урожайность плодов и качество тепличных сортов томатов. Сравнивались три типа мульчирования (биоразлагаемые черные пленки, черная полиэтиленовая пленка, прозрачный полиэтилен низкой плотности) и контроль без мульчирования. Мульчирование привело к самым высоким показателям урожайности плодов и роста, тогда как немulьчируемые контрольные посевы – к самым низким. Содержание растворимых твердых веществ, уровень антиоксидантов и антиоксидантной активности в плодах были самыми высокими при мульчировании биораз-

лагаемыми пленками. Таким образом, биоразлагаемые полимеры улучшили условия роста корней томатов и качество плодов.

Согласно X. Shan et al. [47], мульчирование биоразлагаемыми и полиэтиленовыми пленками эффективно увеличило урожайность брокколи, перца чили и чеснока – на 17,6–19,0; 21,3–23,3 и 26,0–29,5% соответственно по сравнению с немulьчированной почвой.

A. Abduwaiti et al. [48] проведено тестирование биоразлагаемых пленок в качестве альтернативы мульчированию пластиковой пленкой для картофеля, органического риса, помидоров, тепличных овощей в Китае. Экспериментально доказан положительный эффект.

Биоразлагаемая мульча значительно снижала объемную плотность почвы, повышала микробную активность почвы и активность почвенных ферментов и на 30,35% увеличила урожайность кукурузы [49].

В работе P. Siwek et al. [50] протестировано влияние пленки из черного полилактида на параметры почвы и урожайность выращиваемых в полевых условиях огурцов. Доказано, что данный материал может быть хорошей альтернативой распространённым полипропиленовым нетканым материалам.

Общие преимущества и недостатки применения биоразлагаемых полимерных пленок в качестве мульчи. Как показано выше, биоразлагаемые полимеры можно рассматривать как устойчивые альтернативы обычным пластиковым мульчирующим материалам на основе полиэтилена и полистирола, и они все чаще применяются в сельском хозяйстве. Но при этом существует обеспокоенность по поводу экологической безопасности и потенциального воздействия этих материалов на агроэкосистемы. Необходимо обобщение и систематизация данных применения биодеградируемых мульчирующих пленок на различных типах почв, для различных культур, в разных условиях посадки. Необходимо исследовать и обобщить воздействие биоразлагаемых мульчирующих материалов и их промежуточных продуктов деградации на сельскохозяйственные культуры и микробиом почвы. Имеющиеся данные [51] говорят о том, что биоразлагаемые пленочные мульчирующие материалы оказывают скрытое неблагоприятное воздействие на

агроэкосистемы, которое не следует недооценивать, и необходимо обратить внимание на экологические риски масштабного использования этих материалов в сельском хозяйстве.

Жидкие мульчирующие составы, наносимые распылением. Особую группу мульчирующих материалов составляет мульча, образованная при распылении на поверхность почвы водного раствора натуральных биоразлагаемых, биосовместимых и нетоксичных полимеров (желатин, целлюлоза, глюкоманн, хитозан, крахмал, альгинат натрия и др. [52, 53]). Благодаря растворимости в воде некоторые синтетические разлагаемые полимеры, такие как полиакриламид, поливиниловый спирт, карбоксиметилцеллюлоза и гидролизированный крахмал-g-полиакрилонитрил, можно легко распылять на почву отдельно или в смеси с питательными веществами или другими мульчирующими материалами [54].

Наиболее активно это направление развивается сейчас в таких странах, как Китай и Италия (Университет Бари, Национальный исследовательский центр Италии, Пизанский университет). Способ известен с 50-х гг. XX в., эффективность его была доказана, но коммерческое внедрение сдерживается высокой ценой материалов. Например, известно, что для борьбы с образованием корки на поверхности почвы, стимулирования всходов и роста томатов и салата-латука может быть эффективно использован калийный полиакриламид в водном растворе низкой концентрации на разных типах почв [55]. Полимер вводят в количестве нескольких миллиграммов на литр в линии орошения, что улучшает кондиционирование влаги, а значит, всхожесть семян. Технология используется с успехом и поныне, например, для улучшения почвы, удаления солей в почве с высокой усадкой и набуханием [56].

Сейчас (начиная с 2016 г. особенно [57]) ведется непрерывный и углубленный поиск по нескольким направлениям, таким как разработка оптимальных составов и оценка воздействия покрытия на качество урожая и свойства почвы на протяжении всего года.

Полисахариды взаимодействуют с молекулами воды, захватывая их в макромолекулярную сеть, взаимодействие сопровождается процессами набухания, гелеобразования, эмульгиро-

вания и пленкообразования. После испарения воды на почве образуется сплошное защитное тонкое покрытие, способное выполнять в той или иной мере функции мульчи. Для улучшения гибкости покрытия в состав вводят пластификаторы – глицерин и полиглицерин (примерно 1,5%). Толщина наносимого покрытия после высыхания – от 1500 до 5000 мкм в зависимости от состава. Срок службы покрытия – не более 6 месяцев в зависимости от условий эксплуатации (открытый или закрытый грунт). Остатки мульчи можно оставлять на почве или зарывать в нее, и микроорганизмы разлагают их, превращая в двуокись углерода или метан, воду и биомассу. Экспериментальные данные показали [51], что необходимое для разложения остатков время составляет не более месяца.

Известны мульчирующие покрытия на основе полисахаридов, способные образовывать относительно водостойкие гибкие полимерные матрицы (гуаровая камедь, камедь рожкового дерева) даже при низкой концентрации (около 1,5 % каждого компонента) [59]. Камеди проявляют лучшие пленкообразующие свойства по сравнению с другими полисахаридами [60]. С целью увеличения прочности покрытия перед нанесением мульчирующего раствора поверхность грунта покрывают смесью муки из морских водорослей и измельченных отрубей пшеницы, для увеличения прочности при растяжении в состав вносят такие наполнители, как целлюлозные волокна, технический углерод (2%) [61]. Технический углерод создает препятствие для прохождения света, тем самым мульча подавляет рост сорняков. Введение в состав целлюлозы обеспечивает повышенную устойчивость к воздействию влаги. Можно отметить дефицит данных по свойствам различных покрытий, полученных из указанных составов, разрозненность методов их определения. Наиболее высокими эксплуатационными характеристиками обладают составы на основе крахмала. Например, L. Chen et al. [62] получили мульчирующее покрытие путем прививки полиакриловой кислоты на картофельный крахмал с последующим сшиванием с N, N'-метилден-бис-акриламидом. Покрытие имеет хорошие механические свойства: прочность на разрыв 20,89 МПа, относительное удлинение при разрыве 59,19 %, водопоглощающая спо-

собность 68,58 г/г, растворимость в воде 4,5 % – и быструю разлагаемость.

В отдельную группу можно выделить жидкие композиции для мульчирования на основе синтетических полимеров с добавками из промышленных отходов биомассы. Используют составы на основе поливинилового спирта и отходы пищевой и агропромышленной промышленности (жом сахарного тростника, пшеничная мука, апельсиновая корка, яблочная кожура, кукурузные волокна, опилки и пшеничная солома) [63]. Экономически целесообразно применение таких составов там, где желатин и жмых сахарного тростника являются побочным продуктом производства. Использование отходов желатина и побочных продуктов фармацевтической, сельскохозяйственной и кожевенной промышленности представляет собой значительный источник белка, что обогащает почву после разложения мульчирующего покрытия. Результаты экспериментов с распылением составов на основе желатина показали, что пленки сохранялись на почве более двух недель, и почва лучше кондиционировалась по сравнению с контрольным образцом.

К этой группе можно отнести композиции для мульчирования распылением на основе гидролизата кератина шерсти [64]. Полимерную структуру получали при его смешивании с поливиниловым спиртом, полиакриламидом, N, N'-метилден-бис-акриламидом и глицерином. Мульчирующий состав содержит элементы, необходимые для роста растений, такие как азот, фосфор, калий, сера, кальций и кремний, высвобождающиеся в почву при разложении. Барьерные свойства для уменьшения испарения воды и сохранения тепла и высокая биоразлагаемость покрытия подтверждены экспериментально.

В работе J.P. Zhang et al. [65] в качестве полимерного связующего для получения мульчирующего покрытия использовался сшитый полимер эпоксидированного льняного масла и 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновой кислоты. В качестве наполнителей применялись следующие промышленные отходы природного происхождения: костная мука, фосфогипс, рапсовый жмых, сосновая хвоя, сосновая кора, отходы мукомольного производства и смесь зерновых отходов и сорняков. Композитные пленки могут

быть сформированы в процессе естественной сушки в течение суток. Время отверждения увеличивалось с увеличением разбавления и количества наполнителя, а также с уменьшением температуры. Было обнаружено, что механические характеристики полученных полимерных композитов ухудшались с увеличением количества наполнителя. Прочность на разрыв, модуль Юнга и относительное удлинение при разрыве композитных пленок находились в диапазонах 0,3–1,8 МПа, 0,8–6,8 МПа и 17–51% соответственно. Набухаемость (2–22 %) зависела от типа и количества наполнителя, размера частиц и гидрофобности. Готовые композитные пленки в течение месяца способны удерживать влаги в почве в 2–2,5 раза больше, чем в почве без покрытия. Биоразлагаемость также экспериментально подтверждена: потеря массы составила 36–60% в течение 6 месяцев выдержки в почве.

Состав и способ нанесения мульчирующих покрытий распылением выдвигают особые требования к подготовке почвы – вспашка, удаление сорняков, выравнивание. Наносить раствор можно на различных фазах роста (при посеве семян, высадке луковиц, под корень растения). Росток легко пробивает покрытие, при посадке луковиц и саженцев покрытие удаляется вместе с грунтом. В некоторых случаях, напротив, распыление менее трудоемко, поскольку не требует ручных операций, таких как нарезка и укладка пластиковых пленок на лотки или горшки, для нанесения можно использовать широко применяемые в сельском хозяйстве распылительные устройства. Сравнить корректно по эксплуатационным показателям экструдированные пленки и наносимые распылением покрытия не представляется возможным, т.к. не разработана методика. В литературе имеются отдельные результаты исследований. Результаты экспериментов [66, 67], показали, как биоразлагаемые материалы сохраняют свои механические и радиометрические свойства в процессе эксплуатации в течение одного сельскохозяйственного сезона.

Внедрение биоразлагаемых материалов на рынке мульчирующих покрытий сдерживается их высокой ценой. Однако есть исследования, показывающие экономическую эффективность биоразлагаемых материалов [69, 69]. Если учитывать затраты на утилизацию полимерных пленок и малую толщину покрытия при исполь-

зовании технологии распыления, тогда можно говорить о конкурентоспособности [59]. Есть и другие проблемы, но они являются общими для пленочных материалов и жидких мульчирующих составов для распыления. Они будут обозначены в общих выводах ниже.

ВЫВОДЫ

1. Несмотря на обширные мировые исследования в области биоразлагаемых материалов для мульчирования сельскохозяйственных угодий и наличие линейки коммерчески доступных продуктов, активного внедрения их в практику сельского хозяйства не наблюдается, на что есть несколько причин. Это не только проблемы высокой стоимости, но и вопросы внедрения в существующие агротехнологии, а также технологические сложности производства.

2. Научные исследования технологии биоразлагаемых материалов для мульчирования развиваются в основном в направлениях разработки оптимального состава композиции для получения пленки с более высокими показателями влагостойкости и механической прочности. Исследования и разработки в междисциплинарных областях можно разделить на три основных направления: обоснование необходимости применения биоразлагаемой мульчирующей пленки; практика мульчирования и достигаемые эффекты; изучение процессов деградации биоразлагаемой мульчирующей пленки.

3. В ряде критических обзоров утверждается, что применение биоразлагаемой мульчирующей пленки в больших масштабах нецелесообразно ввиду отсутствия сведений об экологических последствиях для почвенных экосистем и накопления биоразлагаемых фрагментов в сельскохозяйственной и садоводческой продукции. По этой причине требуются широкомасштабные исследования в пролонгированном периоде влияния биоразлагаемых материалов на показатели качества почв для доказательства их экологической безопасности.

Работа выполнена за счет средств Программы развития РГАУ — МСХА им. К.А. Тимирязева в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишнякова Н.М. Микроклимат и урожай при мульчировании почвы пленкой. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 79 с.
2. Латыпова А.Л., Соромотина Т.В. Влияние мульчирующих материалов на суточные изменения температуры почвы // Пермский аграрный вестник. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
3. Бесчеревных В.А. Мульчирование почвы полимерными материалами // Химия в сельском хозяйстве. – 1986. – Т. 24, № 9. – С. 39–41.
4. Соромотина Т.В., Федурин О.Н. Влияние мульчирующих материалов на агрофизические свойства почвы // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 12. – С. 4–6.
5. *It is still too early to promote biodegradable mulch film on a large scale: A bibliometric analysis* / L. Liu, G. Zou, Q. Zuo [et al.] // *Environmental Technology Innovation*. – 2022. – N 27 (3). – P. 102487–102514.
6. Гончарук Н.С. Полимеры в овощеводстве. – М.: Колос, 1971. – 264 с.
7. Katan J., DeVay J.E., Greenberger A. The Biological Control Induced by Soil Solarization // *Vascular Wilt Diseases of Plants*. NATO ASI Series. – 1989. – Vol. 28. – P. 493–499.
8. *Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers* / A. Shafqat, N. Al-Zaqri, A. Tahira, A. Alsalmeh // *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2020. – N 28. – P. 1–11.
9. Sintim H., Flury M. Is Biodegradable Plastic Mulch the Solution to Agriculture's Plastic Problem? // *Environmental science technology*. – 2017. – N 51. – P. 1068–1069.
10. ГОСТ 10354-82. Пленка полиэтиленовая. Технические условия. – Введ. 01.07.83. – М.: Стандартинформ, 2007. – 22с.
11. Пат. 1596736 Российская Федерация, МПК C09K 17/00. Мульча и способ ее получения / Габдуллин А.Г.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт овощеводства Научно-производственного объединения по овощеводству «Россия». – № 4673588/15: заявл. 19.01.1989; опубл. 10.04.1995. – 2 с.
12. Пат. 2737425 Российская Федерация, МПК C09K 17/00. Мульчирующая биоразлагаемая полимерная пленка и способ ее получения / Масталыгина Е.Е., Ахметшина З.Р., Анпилова А.Ю., Пантюхов П.В., Попов А.А.; заявители и патентообладатели Масталыгина Е.Е., Пантюхов П.В. – № 2020107147: заявл. 17.02.2020; опубл. 30.11.2020. – Бюл. № 34.
13. Пат. 2646623 Российская Федерация, МПК C09K 17/52. Биоразлагаемая мульча для применения в сельском хозяйстве / Бьель Боррас Альфонсо, Сарагоса Лариос Карлос, Сирухеда Рансинберхер Алисия [и др.]; заявитель и патентообладатель СФИЭР ГРУП СПЕЙН, С.Л. – № 2015139580: заявл. 14.02.2014; опубл. 06.03.2018. – Бюл. № 7.
14. Поляков Д.Г., Бакиров Ф.Г. Органическая мульча и No-till в земледелии: обзор зарубежного опыта // *Земледелие*. – 2020. – № 1. – С. 3–7.
15. Влияние минимизации обработки на баланс углерода в почве в лесостепи Новосибирского Приобья / И.Н. Шарков, В.А. Андроханов, Л.М. Самохвалова, П.В. Антипина // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. – 2023. – № 1 (66). – С. 99–106. – DOI: 10.31677/2072-6724-2023-66-1-99-106.
16. Сравнительная оценка технологий возделывания яровой мягкой пшеницы с различным уровнем интенсификации в условиях Курской области / В.И. Лазарев, Р.И. Лазарева, Б.С. Ильин [и др.] // *Достижения науки и техники АПК*. – 2020. – Т. 34, № 5. – С. 24–27. – DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10504.
17. Iriany A., Hasanah F., Hartawati. Study of Various Organic Mulch Sheet Compositions Usage towards The Growth and Yield of Cauliflower (*Brassica oleracea* Var Botrytis, L.) // *International Journal of Engineering Technology*. – 2019. – N 8. – P. 147–151.
18. *Polymers Use as Mulch Films in Agriculture—A Review of History, Problems and Current Trends* / Z. Mansoor, F.L. Tchuenbou-Magaia, M. Kowalczyk [et al.] // *Polymers*. – 2022. – N 14. – P. 1–29.
19. Батыров В.А. Влияние площади питания и мульчирования на урожайность томатов (*Lycopersicon esculentum*) // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2013. – № 3 (41). – С. 74–76.

20. *Effects of black geotextile mulch and grass mulch on the microclimate, fruit quality and anthocyanin components of Xinyu table grape* / J. Hu, S. Bai, R. Zhao [et al.] // *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. – 2022. – P. 1–18.
21. Ревенко В.Ю., Мацола Н.А., Агафонов О.М. Применение укрывных мульчирующих материалов в селекционном процессе // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2018. – С. 118–124.
22. Якимова О.В., Лазько В.Э. Применение полимерной биоразлагаемой пленки и вторичной целлюлозы в качестве мульчирующего материала на посевах дыни сорта Стрельчанка // *Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии возделывания и переработки сельскохозяйственных культур: сб. материалов 11-й Всерос. конф. молодых учёных и специалистов*. – Краснодар, 2021. – С. 278–283.
23. Розметов К.С. Влияние мульчирования на влажность почвы и мощность почвенной корки // *Молодой ученый*. – 2011. – № 5 (28). – С. 266–268.
24. Пат. № 2758108 Российская Федерация, МПК A01G13/02 C09K17/52. Мульчирующая композиция, способ ее получения и соответствующие применения / Кемппайнен Р., Тииликкала К.; заявитель и патентообладатель ЛЮОННОНВАРАКЕСКУС. – № 2019118782: заявл. 07.12.2017: опубл. 26.10.2021. – Бюл. № 30. – 10 с.
25. *Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use* / V. Falguera, C.J. Quintero, A. Jiménez [et al.] // *Trends in Food Science Technology*. – 2011. – N 22 (6). – P. 292–303.
26. *Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review* / R. Suhag, N. Kumar, A. Trajkovska Petkoska, A. Upadhyay // *Food Research International*. – 2020. – N 136. – P. 109582–109718.
27. *Scaling up difficulties and commercial aspects of edible films for food packaging: A review* / J.J. Jayaraj, Dr.M. Chandrasekaran, S.P. Venkatesan [et al.] // *Trends in Food Science Technology*. – 2020. – N 100. – P. 210–222.
28. *Current and emerging biodegradable mulch films based on polysaccharide bio-composites. A review* / M. Menossi, M. Cisneros, V.A. Alvarez, C. Casalengué // *Agronomy for Sustainable Development*. – 2021. – P. 41–53.
29. *Natural Polymers and Additives in Commodity and Specialty Applications: A Challenge for the Chemistry of Future* / M. Malinconico, P. Cerruti, G. Santagata, B. Immirzi // *Macromolecular Symposia*. – 2014. – N 337. – P. 124–133.
30. *Production, characterization, and optimization of starch-based biodegradable bioplastic from waste potato (Solanum tuberosum) peel with the reinforcement of false banana (Ensete ventricosum) fiber* / T.Y. Chaffa, B.T. Meshesha, S.A. Mohammed, S. Jabasingh // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2022. – P. 1–13.
31. *Developing Biodegradable Mulch Films from Starch-Based Polymers* / P. Halley, R. Rutgers, S. Coombs [et al.] // *Starch-Starke*. – 2001. – N 53. – P. 362–367.
32. *Effect of starch initial moisture on thermoplastic starch film properties and its performance as agricultural mulch film* / M. Menossi, M. Salcedo, J. Capiel [et al.] // *Journal of Polymer Research*. – 2022. – N 29. – P. 2114–2137.
33. Пат. US2020140757A1, IPC C09K17/52. Cellulose derived hydrophobic, bio-degradable films for mulch other applications / Sabornie C.; applicants RAYONIER PERFORMANCE FIBERS LLC. – № US16/178944A: Appl. 02.12.2018; Publ. 07.05.2020. – P. 11.
34. *Effect of Long-Term Biodegradable Film Mulch on Soil Physicochemical and Microbial Properties* / M. Zhang, Y. Xue, T. Jin [et al.] // *Toxics*. – 2022. – N 10. – P. 129–139.
35. *Sustainable and hydrophobic polysaccharide-based mulch film with thermally stable and ultraviolet resistance performance* / Zh. Sun, R. Ning, M. Qin [et al.] // *Carbohydrate Polymers*. – 2022. – N 295. – P. 119865–120160.
36. Merino D., Gutiérrez T.J., Alvarez V.A. Potential Agricultural Mulch Films Based on Native and Phosphorylated Corn Starch With and Without Surface Functionalization with Chitosan // *Journal of Polymers and the Environment*. – 2019. – N 27. – P. 97–105.
37. Zhang M., Chen H. Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2023. – N 233. – P. 123462–123695.

38. *Agri-Biodegradable Mulch Films Derived from Lignin in Empty Fruit Bunches* / K. Sirivechphongkul, N. Chiarasumran, M. Saisriyoot [et al.] // *Catalysts*. – 2022. – N 12. – P. 1150–1162.
39. *Пат. № CN109679299A*, Китай, МПК A01G13/02; C08J5/18; C08K13/02; C08K3/28; C08K3/32; C08K5/20; C08K5/21; C08K5/47; C08L23/06; C08L23/08; C08L23/12; C08L23/30; C08L67/02; C08L91/06. Fully biodegradable plastic film with controllable induction period and preparation method thereof / Zhen Zhichao, Ji Junhui, Feng Wutong [et al.]; заявитель и патентообладатель TECHNICAL INST PHYSICS & CHEMISTRY CAS. – № CN201811405444A: заявл. 23.11.2018; опубл. 26.04.2019. – 2 с.
40. *Пат. № 2786367* Российская Федерация, МПК C08L7/00, C08L101/16, C08L67/04, D04H13/00. Биоразлагаемый функциональный материал сельскохозяйственного назначения / Тертышная Ю.В, Михайлов И. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова». – № 2022107212: заявл. 18.03.2022; опубл. 20.12.2022 – 6 с.
41. *Пат. № CN108690333A*, Китай, МПК A01G13/02; B32B27/06; B32B27/08; B32B27/18; B32B27/36; B32B33/00; C08J5/18; C08K13/02; C08K3/22; C08K3/30; C08K3/34; C08K5/09; C08K5/20; C08L67/02; C08L69/00. High-barrier biodegradable mulch film and preparation method thereof / Zhang Chunhua; Shen Kunliang; Feng Aihua; заявитель и патентообладатель NANTONG HUASHENG POLYMER TECH CO LTD. – № CN201810311830A: заявл. 09.04.2018; опубл. 23.10.2018. – 2 с.
42. *Mechanical properties, thermal behavior, miscibility and light stability of the poly(butyleneadipate-co-terephthalate)/poly(propylene carbonate)/polylactide mulch films* / X. Wang, H. Pan, S. Jia [et al.] // *Polymer Bulletin*. – 2023. – N 80. – P. 2485–2501.
43. *Preparation of eco-friendly cryogel absorbent/paper mulch composite with cellulose/ZnCl₂ gel as adhesive* / Sh. Zhang, Ji. Zhou, X. Gao, H. Zhang // *Industrial Crops and Products*. – 2022. – N 177. – P. 114477–114477.
44. *Effects of Biodegradable Mulch on Soil Quality* / C. Li, J. Moore-Kucera, J. Lee [et al.] // *Applied Soil Ecology*. – 2014. – N 79. – P. 59–69.
45. *Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality* / X. Zhang, S. You, Y. Tian, J. Li // *Scientia Horticulturae*. – 2019. – N 249. – P. 38–48.
46. *Plant growth, yield, and fruit quality of tomato affected by biodegradable and non-degradable mulches* / A. Şekara, R. Pokluda, E. Cozzolino [et al.] // *Horticultural Science (HORTSCI)*. – 2019. – N 46. – P. 138–145.
47. *Comparative Analysis of the Effects of Plastic Mulch Films on Soil Nutrient, Yields and Soil Microbiome in Three Vegetable Fields* / X. Shan, C. Zhang, Z. Dai [et al.] // *Agronomy*. – 2022. – N 12 (2). – P. 56–68.
48. *Testing Biodegradable Films as Alternatives to Plastic-Film Mulching for Enhancing the Yield and Economic Benefits of Processed Tomato in Xinjiang Region* / A. Abduwaiti, X. Liu, Ch. Yan [et al.] // *Sustainability*. – 2021. – N 13. – P. 3097–4010.
49. *Biodegradable film mulching promotes better soil quality and increases summer maize grain yield in North China Plain* / M. Li, Q. Zhang, S. Wei [et al.] // *Archives of Agronomy and Soil Science*. – 2022. – № 69 (3). – P. 1–17.
50. *Siwek P., Domagała-Świątkiewicz I., Kalisz A.* The influence of degradable polymer mulches on soil properties and cucumber yield // *Agrochimica-Pisa*. – 2015. – N 59 (2). – P. 108–123.
51. *Environmental fate and impacts of biodegradable plastics in agricultural soil ecosystems* / A. Mo, Y. Zhang, W. Gao [et al.] // *Applied Soil Ecology*. – 2023. – N 181 (part B). – P. 104667–104848.
52. *Addition of glycerol plasticizer to seaweeds derived alginates: Influence of microstructure on chemical-physical properties* / M. Avella, E.D. Pace, B. Immirzi [et al.] // *Carbohydrate Polymers*. – 2007. – N 69. – P. 503–511.
53. *Monitoring of the degradation dynamics of agricultural films by IR thermography* / P. Mormile, L. Petti, M. Rippa [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. – 2007. – N 92 (5). – P. 777–784.
54. *Kay B.L., Evans R.A., Young J.A.* Soaking procedures and hydro-seeder damage to common bermudagrass seeds // *Agronomy journal*. – 1977. – N 69. – Pp. 555–557.
55. *Wallace A.* Anionic Polyacrylamide Treatment of Soil Improves Seedling Emergence and Growth // *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science*. – 1987. – N 22 (5). – P. 951.

56. Malik M., Amrhein C., Letey J. Polyacrylamide to Improve Water Flow and Salt Removal in a High Shrink-Swell Soil // *Soil Science Society of America Journal*. – 1991. – N 55 (6). – P. 55.
57. *Integrated* quantitative bibliometric and in-depth qualitative content analysis of global biodegradable liquid mulching film research: Progress, hotspots and prospect / J.P. Zhang, Z. Yang, J.Q. Hou [et al.]. – 2022. – P. 35.
58. Schettini E., Vox G., De Lucia B. Effects of the radiometric properties of innovative biodegradable mulching materials on snapdragon cultivation // *Science Horticulture-Amsterdam*. – 2007. – N 112 (4). – P. 456–461.
59. *An overview* on innovative biodegradable materials for agricultural applications / M. Malinconico, B. Immirzi, G. Santagata [et al.] // *Progress in Polymer Degradation and Stability Research*. – Italy: Nova Science Publishers, 2008. – P. 69–114.
60. Thimma Reddy T., Tammishetti S. Free radical degradation of guar gum // *Polymer Degradation and Stability*. – 2004. – P. 455–459.
61. *Sustainable* greenhouse systems / G. Vox, M. Teitel, A. Pardossi [et al.] // *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*. – 2010. – P. 1–79.
62. *Fabrication* and characterization of one high-hygroscopicity liquid starch-based mulching materials for facilitating the growth of plant / L. Chen, R. Dai, Z. Shan, H. Chen // *Carbohydrate Polymers*. – 2020. – N 15. – P. 218–231.
63. *Environmentally* Degradable Bio-Based Polymeric Blends and Composites / E. Chiellini, Patrizia, P. Cinelli, F. Federica Chiellini, H.S. Imam // *Macromolecular Bioscience*. – 2004. – N 15. – P. 218–231.
64. Li W., Chen Y., Zhang S. Hydrolysis of abandoned bovine hair by pulping spent liquor and preparation of degradable keratin-based sprayable mulch film // *Bioresources*. – 2020. – N 15. – P. 5058–5071.
65. *Biodegradable* Linseed Oil-Based Cross-Linked Polymer Composites Filled with Industrial Waste Materials for Mulching Coatings / J. Vaicekauskaitė, J. Ostrauskaitė, J. Treinyte [et al.] // *Journal of Polymers and the Environment*. – 2019. – N 27. – P. 395–404.
66. Briassoulis D. Mechanical behaviour of biodegradable agricultural films under real field conditions // *Polymer Degradation and Stability*. – 2006. – P. 1256–1272.
67. Scarascia - Mugnozza G., Schettini E., Vox G. Effects of Solar Radiation on the Radiometric Properties of Biodegradable Films for Agricultural Applications // *Biosystems Engineering*. – 2004. – P. 479–487.
68. Ghosh K., Jones B. Roadmap to Biodegradable Plastics — Current State and Research Needs // *ACS Sustainable Chemistry Engineering*. – 2021. – N 9. – P. 6170–6187.
69. *The Use* of Hydromulching as an Alternative to Plastic Films in an Artichoke (*Cynara Cardunculus* cv. Symphony) Crop: A Study of the Economic Viability / J. López-Marin, M. Romero Muñoz, A. Gálvez // *Sustainability*. – 2021. – N 13. – P. 5313–5326.

REFERENCES

1. Vishnjakova N.M., *Mikroklimat i urozhaj pri mul'chirovanii pochvy plenok* (Microclimate and yield when mulching the soil with a film, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 79 p.
2. Latypova A.L., Soromotina T.V., *Permskij agrarnyj vestnik*, 2016, No. 2, pp. 54–60. (In Russ.)
3. Bescherevnyh V.A., *Himija v sel'skom hozjajstve*, 1986, Vol. 24, No. 9, pp. 39–41 (In Russ.)
4. Soromotina T.V., Fedurina O.N., *Agrarnyj vestnik Urala*, 2012, No. 12, pp. 4–6. (In Russ.)
5. Liu L., Zou G., Zuo Q., Li S., Bao Z., Jin T., Liu D., Du L., It is still too early to promote biodegradable mulch film on a large scale: A bibliometric analysis, *Environmental Technology Innovation*, 2022, No. 27 (3), pp. 102487–102514.
6. Goncharuk N.S., *Polimery v ovoshhevodstve* (Polymers in vegetable growing), Moscow: Kolos, 1971, 264 p.
7. Katan J., DeVay J.E., Greenberger A., The Biological Control Induced by Soil Solarization, *Vascular Wilt Diseases of Plants. NATO ASI Series*, 1989, Vol. 28, pp. 493–499.
8. Shafqat A., Al-Zaqri N., Tahira A., Alsalmeh A., Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020, No. 28, pp. 1–11.
9. Sintim H., Flury M., Is Biodegradable Plastic Mulch the Solution to Agriculture's Plastic Problem? *Environmental science technology*, 2017, No. 51, pp. 1068–1069.
10. GOST 10354-82. *Plenka polijetilenovaja. Tehnicheskie uslovija* (Polyethylene film. Technical conditions), Vved. 01.07.83, Moscow: Standartinform, 2007, 22 p. (In Russ.)

11. *Pat. 1596736 Rossijskaja Federacija*, MPK C09K 17/00. Mul'cha i sposob ee poluchenija, Gabdullin A.G.; заявитель i patentoobladatel' Vsesojuznyj nauchno-issledovatel'skij institut ovoshhevodstva Nauchno-proizvodstvennogo ob#edinenija po ovoshhevodstvu «Rossija», № 4673588/15: заявл. 19.01.1989; opubl. 10.04.1995, 2 p. (In Russ.)
12. *Pat. 2737425 Rossijskaja Federacija*, MPK C09K 17/00. Mul'chirujushhaja biorazlagaemaja polimernaja plenka i sposob ee poluchenija, Mastalygina E.E., Ahmetshina Z.R., Anpilova A.Ju., Pantjuhov P.V., Popov A.A.; заявитель i patentoobladatel' Mastalygina E.E., Pantjuhov P.V., № 2020107147: заявл. 17.02.2020; opubl. 30.11.2020., Bjul. № 34. (In Russ.)
13. *Pat. 2646623 Rossijskaja Federacija*, MPK C09K 17/52. Biorazlagaemaja mul'cha dlja primeneni-ja v sel'skom hozjajstve, B'el' Borrás Al'fonso, Saragosa Larios Karlos, Siruheda Ransinberher Alisija [i dr.]; заявитель i patentoobladatel' SFIJeR GRUP SPEJN, S.L., № 2015139580: заявл. 14.02.2014: opubl. 06.03.2018. Bjul. № 7. (In Russ.)
14. Poljakov D.G., Bakirov F.G., *Zemledelie*, 2020, No. 1, pp. 3–7. (In Russ.)
15. Sharkov I.N., Androhanov V.A., Samohvalova L.M., Antipina P.V., *Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet)*, 2023, No. 1 (66), pp. 99–106, DOI 10.31677/2072-6724-2023-66-1-99-106. (In Russ.)
16. Lazarev V.I., Lazareva R.I., Il'in B.S. [i dr.], *Dostizhenija nauki i tehniki APK*, 2020, T. 34, No. 5, pp. 24–27, DOI 10.24411/0235-2451-2020-10504. (In Russ.)
17. Iriany A., Hasanah F., Hartawati, Study of Various Organic Mulch Sheet Compositions Usage towards The Growth and Yield of Cauliflower (Brassica oleracea Var Botrytis, L.), *International Journal of Engineering Technology*, 2019, No. 8, pp. 147–151.
18. Mansoor Z., Tchuhenbou-Magaia F.L., Kowalczyk M. [et al.], Polymers Use as Mulch Films in Agriculture – A Review of History, Problems and Current Trends, *Polymers*, 2022, No. 14, pp. 1–29.
19. Batyrov V.A., *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, No. 3 (41), pp. 74–76. (In Russ.)
20. Hu J., Bai S., Zhao R., Chen G., Cai J., Effects of black geotextile mulch and grass mulch on the microclimate, fruit quality and anthocyanin components of Xinyu table grape, *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2022, pp. 1–18.
21. Revenko V.Ju., Macola N.A., Agafonov O.M., *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, 2018, pp. 118–124. (In Russ.)
22. Jakimova O.V., Laz'ko V.Je., *Aktual'nye voprosy biologii, selekcii, tehnologii vozdeľyvanija i pererabotki sel'skohozjajstvennyh kul'tur* (Current issues of biology, selection, technology of cultivation and processing of agricultural crops), Proceedings of the Conference Title, Krasnodar, 2021, pp. 278–283. (In Russ.)
23. Rozmetov K.S., *Molodoj uchenyj*, 2011, No. 5 (28), pp. 266–268. (In Russ.)
24. *Pat. № 2758108 Rossijskaja Federacija*, MPK A01G13/02 C09K17/52. Mul'chirujushhaja kompozicija, sposob ee poluchenija i sootvetstvujushhie primenenija, Kemppajnen R., Tiilikkala K.; заявитель i patentoobladatel' LUONNONVARAKESKUS, № 2019118782: заявл. 07.12.2017: opubl. 26.10.2021., Bjul. № 30, 10 p. (In Russ.)
25. Falguera V., Quintero C. J., Jiménez A., Muñoz A., Ibarz A., Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use, *Trends in Food Science Technology*, 2011, No. 22 (6), pp. 292–303.
26. Suhag R., Kumar N., Trajkovska Petkoska A., Upadhyay A., Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review, *Food Research International*, 2020, No. 136, pp. 109582–109718.
27. Jayaraj J.J., Chandrasekaran Dr.M., Venkatesan S.P., Sriram V., Britto J., Govindaraj M., Durairaj R.B., Scaling up difficulties and commercial aspects of edible films for food packaging: A review, *Trends in Food Science Technology*, 2020, No. 100, pp. 210–222.
28. Menossi M., Cisneros M., Alvarez V.A., Casalongué C., Current and emerging biodegradable mulch films-based on polysaccharide bio-composites. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, pp. 41–53.
29. Malinconico M., Cerruti P., Santagata G., Immirzi B., Natural Polymers and Additives in Commodity and Specialty Applications: A Challenge for the Chemistry of Future, *Macromolecular Symposia*, 2014, No. 337, pp. 124–133.
30. Chaffa T.Y., Meshesha B.T., Mohammed S.A., Jabasingh S., Production, characterization, and optimization of starch-based biodegradable bioplastic from waste potato (*Solanum tuberosum*) peel with the reinforcement of false banana (*Ensete ventricosum*) fiber, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, pp. 1–13.

31. Halley P., Rutgers R., Coombs S., Kettels J., Gralton J., Christie G., Jenkins M., Beh H., Griffin K., Jayasekara R., Lonergan G., Developing Biodegradable Mulch Films from Starch-Based Polymers, *Starch – Starke*, 2001, No. 53, pp. 362–367.
32. Menossi M., Salcedo M., Capiel J. [et al.], Effect of starch initial moisture on thermoplastic starch film properties and its performance as agricultural mulch film, *Journal of Polymer Research*, 2022, No. 29, pp. 2114–2137.
33. Patent US2020140757A1, IPC C09K17/52. Cellulose derived hydrophobic, bio-degradable films for mulch other applications, Sabornie C.; applicants RAYONIER PERFORMANCE FIBERS LLC, No. US16/178944A: Appl. 02.12.2018; Publ. 07.05.2020, pp. 11.
34. Zhang M., Xue Y., Jin T., Zhang K., Li Z., Sun C., Mi Q., Li Q., Effect of Long-Term Biodegradable Film Mulch on Soil Physicochemical and Microbial Properties, *Toxics*, 2022, No. 10, pp. 129–139.
35. Sun Zh., Ning R., Qin M., Liang J., Jiang J., Sun W., Liu X., Zi M., Sustainable and hydrophobic polysaccharide-based mulch film with thermally stable and ultraviolet resistance performance, *Carbohydrate Polymers*, 2022, No. 295, pp. 119865–120160.
36. Merino D., Gutiérrez T.J., Alvarez V.A., Potential Agricultural Mulch Films Based on Native and Phosphorylated Corn Starch With and Without Surface Functionalization with Chitosan, *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, No. 27, pp. 97–105.
37. Zhang M., Chen H., Development and characterization of starch sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, No. 233, pp. 123462–123695.
38. Sirivechphongkul K., Chiarasumran N., Saisriyoot M., Thanapimmetha A., Srinophakun P., Iamsaard K., Lin Y.T., Agri-Biodegradable Mulch Films Derived from Lignin in Empty Fruit Bunches, *Catalysts*, 2022, No. 12, pp. 1150–1162.
39. Pat. № CN109679299A, Kitaj, MPK A01G13/02; C08J5/18; C08K13/02; C08K3/28; C08K3/32; C08K5/20; C08K5/21; C08K5/47; C08L23/06; C08L23/08; C08L23/12; C08L23/30; C08L67/02; C08L91/06., Fully biodegradable plastic film with controllable induction period and preparation method thereof, Zhen Zhichao, Ji Junhui, Feng Wutong [et al.]; заявитель i патентообладатель TECHNICAL INST PHYSICS & CHEMISTRY CAS, № CN201811405444A: заявл. 23.11.2018; opubl. 26.04.2019., 2 p. (In Russ.)
40. Pat. № 2786367 Rossijskaja Federacija, MPK C08L7/00, C08L101/16, C08L67/04, D04H13/00. Biorazlagaemyj funkcional'nyj material sel'skohozjajstvennogo naznachenija, Tertyshnaja Ju.V, Mihajlov I.A.; заявитель i патентообладатель Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Rossijskij jekonomicheskij universitet imeni G. V. Plehanova», № 2022107212: заявл. 18.03.2022; opubl. 20.12.2022, 6 p. (In Russ.)
41. Pat. № CN108690333A, Kitaj, MPK A01G13/02; B32B27/06; B32B27/08; B32B27/18; B32B27/36; B32B33/00; C08J5/18; C08K13/02; C08K3/22; C08K3/30; C08K3/34; C08K5/09; C08K5/20; C08L67/02; C08L69/00, High-barrier biodegradable mulch film and preparation method thereof, Zhang Chunhua; Shen Kunliang; Feng Aihua; заявитель i патентообладатель NANTONG HUASHENG POLYMER TECH CO LTD, № CN201810311830A: заявл. 09.04.2018; opubl. 23.10.2018., 2 p. (In Russ.)
42. Wang X., Pan H., Jia S., Lu Z., Han L., Zhang H., Mechanical properties, thermal behavior, miscibility and light stability of the poly(butylene adipate co terephthalate)/poly(propylene carbonate)/polylactide mulch films, *Polymer Bulletin*, 2023, No. 80, pp. 2485–2501.
43. Zhang Sh., Zhou Ji., Gao X., Zhang H., Preparation of eco-friendly cryogel absorbent/paper mulch composite with cellulose/ZnCl₂ gel as adhesive, *Industrial Crops and Products*, 2022, No. 177, pp. 114477–114477.
44. Li C., Moore-Kucera J., Lee J., Corbin A., Brodhagen M., Miles C., Inglis D., Effects of Biodegradable Mulch on Soil Quality, *Applied Soil Ecology*, 2014, No. 79, pp. 59–69.
45. Zhang X., You S., Tian Y., Li J., Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality, *Scientia Horticulturae*, 2019, No. 249, pp. 38–48.
46. Şekara A., Pokluda R., Cozzolino E., Piano L., Cuciniello A., Caruso G., Plant growth, yield, and fruit quality of tomato affected by biodegradable and non-degradable mulches, *Horticultural Science (HORTSCI)*, 2019, No. 46, pp. 138–145.
47. Shan X., Zhang C., Dai Z., Li J., Mao W., Yu F., Ma J., Wang S., Zeng X., Comparative Analysis of the Effects of Plastic Mulch Films on Soil Nutrient, Yields and Soil Microbiome in Three Vegetable Fields, *Agronomy*, 2022, No. 12 (2), pp. 56–68.

48. Abduwaiti A., Liu X., Yan Ch., Xue, Yi., Jin T., Wu H., He P., Bao Zh., Liu Q., Testing Biodegradable Films as Alternatives to Plastic-Film Mulching for Enhancing the Yield and Economic Benefits of Processed Tomato in Xinjiang Region, *Sustainability*, 2021, No. 13, pp. 3097–4010.
49. Li M., Zhang Q., Wei S., Liu Z., Zong R., Jin T., Zhang M., Sun C., Li Q., Biodegradable film mulching promotes better soil quality and increases summer maize grain yield in North China Plain, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, No. 69 (3), pp. 1–17.
50. Siwek P., Domagała-Świątkiewicz I., Kalisz A., The influence of degradable polymer mulches on soil properties and cucumber yield, *Agrochimica-Pisa*, 2015, No. 59 (2), pp. 108–123.
51. Mo A., Zhang Y., Gao W. [et al.], Environmental fate and impacts of biodegradable plastics in agricultural soil ecosystems, *Applied Soil Ecology*, 2023, No. 181 (part B), pp. 104667–104848.
52. Avella M., Pace E.D., Immirzi B., Impallomeni G., Malinconico M., Santagata G., Addition of glycerol plasticizer to seaweeds derived alginates: Influence of microstructure on chemical–physical properties, *Carbohydrate Polymers*, 2007, No. 69, pp. 503–511.
53. Mormile P., Petti L., Rippa M., Immirzi B., Malinconico M., Santagata G., Monitoring of the degradation dynamics of agricultural films by IR thermography, *Polymer Degradation and Stability*, 2007, No. 92 (5), pp. 777–784.
54. Kay B.L., Evans R.A., Young J.A., Soaking procedures and hydro-seeder damage to common bermudagrass seeds, *Agronomy journal*, 1977, No. 69, pp. 555–557.
55. Wallace A., Anionic Polyacrylamide Treatment of Soil Improves Seedling Emergence and Growth, *Hort-Science: a publication of the American Society for Horticultural Science*, 1987, No. 22 (5), pp. 951.
56. Malik M., Amrhein C. Letey J., Polyacrylamide to Improve Water Flow and Salt Removal in a High Shrink-Swell Soil, *Soil Science Society of America Journal*, 1991, No. 55 (6), pp. 55.
57. Zhang J.P., Yang Z., Hou J.Q., Xi B.D., Li M., Wei Y.F., Chen W.M., Yang T.X., Integrated quantitative bibliometric and in-depth qualitative content analysis of global biodegradable liquid mulching film research: Progress, hotspots and prospect, 2022, pp. 35.
58. Schettini E., Vox G., De Lucia B., Effects of the radiometric properties of innovative biodegradable mulching materials on snapdragon cultivation, *Science Hortic-Amsterd*, 2007, No. 112 (4), pp. 456–461.
59. Malinconico M., Immirzi B., Santagata G. [et al.], An overview on innovative biodegradable materials for agricultural applications, *Progress in Polymer Degradation and Stability Research*, Italy: Nova Science Publishers, 2008, pp. 69–114.
60. Thimma Reddy T., Tammishetti S., Free radical degradation of guar gum, *Polymer Degradation and Stability*, 2004, pp. 455–459.
61. Vox G., Teitel M., Pardossi A., Minuto A., Tinivella F., Schettini E., Sustainable greenhouse systems, *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*, 2010, pp. 1–79.
62. Chen L., Dai R., Shan Z., Chen H., Fabrication and characterization of one high-hygroscopicity liquid starch-based mulching materials for facilitating the growth of plant, *Carbohydrate Polymers*, 2020, No. 15, pp. 218–231.
63. Chiellini E., Patrizia Cinelli P., Federica Chiellini F., H. Imam H.S., Environmentally Degradable Bio-Based Polymeric Blends and Composites, *Macromolecular Bioscience*, 2004, No. 15, pp. 218–231.
64. Li W., Chen Y., Zhang S., Hydrolysis of abandoned bovine hair by pulping spent liquor and preparation of degradable keratin-based sprayable mulch film, *Bioresources*, 2020, No. 15, pp. 5058–5071.
65. Vaicekauskaite J., Ostrauskaite J., Treinyte J., Grazuleviciene V., Bridziuvienė D., Rainosalo E., Biodegradable Linseed Oil-Based Cross-Linked Polymer Composites Filled with Industrial Waste Materials for Mulching Coatings, *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, No. 27, pp. 395–404.
66. Briassoulis D., Mechanical behaviour of biodegradable agricultural films under real field conditions, *Polymer Degradation and Stability*, 2006, pp. 1256–1272.
67. Scarascia - Mugnozza G., Schettini E., Vox G., Effects of Solar Radiation on the Radiometric Properties of Biodegradable Films for Agricultural Applications, *Biosystems Engineering*, 2004, pp. 479–487.
68. Ghosh K., Jones B., Roadmap to Biodegradable Plastics — Current State and Research Needs, *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2021, No. 9, pp. 6170–6187.
69. López-Marín J., Romero Muñoz M., Gálvez A., Del Amor F., Zapata M., Carmen., Brotons Martínez, J.M., The Use of Hydromulching as an Alternative to Plastic Films in an Artichoke (*Cynara Cardunculus* cv. Symphony) Crop: A Study of the Economic Viability, *Sustainability*, 2021, No. 13, pp. 5313–5326.