

О.Д. Пожарская, Ю.В. Хомяков

СВОЙСТВА ГИДРОГЕЛЕЙ И ФАКТОРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ ИХ ДЕГРАДАЦИИ

Введение. Для регулирования водного режима корнеобитаемой среды растения, в том числе для предотвращения водного дефицита, обеспечения длительного и равномерного режима увлажнения почвы применяют суперабсорбирующие полимеры, или гидрогели, которые способны удерживать большой объем воды, превышающий свой собственный в несколько сотен раз. Как правило, применение гидрогеля совмещают с другими мероприятиями по увеличению плодородия почвы, что дает лучший и более пролонгированный результат [Ostrand et al., 2020]. Многочисленные исследования показывают, что применение гидрогеля обеспечивает благоприятные условия для роста и развития пересаживаемого растения [Асаматдинов, 2020; Цепляев, Непокрытый, 2023], например в исследовании [Баканева, 2023] отмечена лучшая приживаемость саженцев дуба черешчатого (*Quercus robur*) на незаливном опытном участке в пойме реки Волга. Гидрогель (полиакрилат калия) вносили в почву в гидратированном (насыщенном водой) виде при посадке саженцев, в каждую лунку вносили по 1 л геля. В исследованиях [Смирнов и др., 2021] показано положительное влияние применяемого гидрогеля на приживаемость ели европейской (*Picea abies*). Гидрогель вносили в почву в набухшем состоянии в концентрации 2 г гидрогеля в сухом виде на одну лунку. Применение гидрогеля в тропических условиях с жарким и влажным климатом и сухим летом, например, в Бразилии способствует улучшению условий роста растений. Например, добавление гидрогеля в концентрациях 1,5, 3,0 и 4,5 г л⁻¹ к саженцам эвкалипта (*Eucalyptus urograndis*) привело к большему росту и производству фитомассы по сравнению с контролем без гидрогеля. Обработки, уровни влажности и дозы гидрогеля в данном исследовании были организованы по полностью рандомизированной схеме. Важно подчеркнуть, что гидрогель не может заменить обычные ирригационные системы, он идет в качестве дополнения [Silva et al., 2024]. Исследования, проведенные в Испании на цитрусовых растениях, показали улучшение физиологических параметров саженцев цитрусовых и повышение их жизнеспособности [Arbona et

al., 2005]. Здесь объем гидрогеля составлял 0,2 и 0,4% от использованного объема субстрата, к которому он был дополнительно добавлен в насыщенном состоянии.

Гидрогели, как представители органических соединений, при их применении в качестве почвенного мелиоранта подвергаются воздействию как условий окружающей среды (температура, ультрафиолетовое излучение, циклы «замерзание – оттаивание», «увлажнение – высыхание», химический состав среды), так и воздействию живых организмов (почвенная фауна, почвенные микроорганизмы и др.). Полиакриламида и полиакрилатов, наиболее распространенные соединения в производстве гидрогелей, могут содержать примеси токсичных мономеров, и есть вероятность их высвобождения в процессе деградации. Помимо химического воздействия после потери своих водопоглощающих свойств образуется твердый остаток из гидрогеля, менее доступный для биodeградации [Buchmann et al., 2024]. Рациональное применение гидрогелей должно обязательно учитывать продолжительность эффекта их применения и скорость деградации до безопасных соединений, для чего необходимо широкое экспериментальное исследование механизмов, скорости, направления деградации таких полимеров в разных условиях.

Материалы и методика исследования. Материалами для настоящего обзора послужили научные публикации российских и зарубежных ученых, находящиеся в открытом доступе.

Результаты исследования. Гидрогели представляют собой трехмерную химически или физически сшитую матрицу из линейных или разветвленных гидрофильных полимеров, где молекулы воды способны занять все доступное пустое пространство в трехмерной сети гидрогеля [Guilherme et al., 2015]. Поэтому гидрогели способны поглощать воду в 500 – 1000 раз больше их собственной сухой массы [Максимова и др., 2023].

По происхождению гидрогели делятся на синтетические, природные и полусинтетические.

Чаще всего используются синтетические гидрогели – полимеры и сополимеры акриламида и акриловой кислоты. Акриловая кислота содержит в своем составе винильный радикал и карбоксильную группу, благодаря чему происходит реакция с электрофильными агентами и свободными радикалами. Полиакрилатов синтезируются методом свободнорадикальной полимеризации из мономеров акриловой кислоты, возможно, также в сочетании с другими мономерами. Для увеличения водоудерживающей спо-

способности различных почв в несколько раз достаточно внести полиакрилатные или полиакриламидные гидрогели в дозе 0,2 – 0,3%. Водопоглощающая способность акриламида зависит как от типа частиц гидрогеля, так и от свойств самой почвы, таких как кислотность, степень засоления, гранулометрический состав [Saha et al., 2021]. В частности, водопоглощающая способность гидрогелей значительно снижается при высоком уровне ионов NO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} или Mg^{2+} в почвенном растворе и давлением почвы на гидрогель [Oksinska et al., 2019]. Стоит отметить, что у набухшего гидрогеля проявляется ухудшение механических свойств. Одним из решений стало использование дополнительных наполнителей в качестве армирующих агентов.

Устойчивость к биodeградации находится в числе основных факторов, ограничивающих использование синтетических гидрогелей [Максимова и др., 2023]. До настоящего времени микробная деградация полиакриламидных и полиакрилатных гидрогелей остается недостаточно исследованной. Известно, что дезаминирование полиакриламида микробами является первым шагом в процессе использования полимера. Полиакрилат, который остается после дезаминирования, по-видимому, более устойчив к биodeградации, чем амидные фрагменты. Тем не менее полиакриламид и полиакрилат обрастают микроорганизмами, способными использовать их в качестве источников углерода [Nyyssola, Ahlgren, 2019]. В свою очередь, в другом исследовании сообщалось, что полиакрилатные гидрогели практически не подвергаются биodeградации и основная цепь полиакрилата разлагается в суглинистых почвах со скоростью не более 0,12-0,24% за 6 месяцев [Wilske et al., 2014].

Небольшое число исследований подтверждают, что штаммы бактерий способны использовать полиакриламид в качестве источника углерода и азота [Matsuoka et al., 2002; Oksinska et al., 2019]. В работе [Oksinska et al., 2019] шитый полимер акрилата калия подвергается биodeградации со стороны почвенных бактерий, грибов и простейших. Штаммы *Bacillus sphaericus*, *Bacillus cereus* и *Bacillus flexus* могут разлагать полиакриламид и использовать его в качестве единственного источника углерода. Также в данном исследовании была проведена оценка потенциального фитосанитарного риска, связанного с использованием гидрогеля, которая показала, что гидрогель может быть колонизирован фитопатогенными оомицетами из рода *Phytophthora*. В исследовании [Максимова и др., 2017] была изучена амидазная активность почвы при добавлении полиакриламида. При инкубации с аллювиальной почвой в течение 38 недель масса полиакрилами-

да заметно снизилась, до 37%. При инкубации с суглинистой почвой и песчаником никаких изменений массы не наблюдалось. В эксперименте [Liang et al., 2018] отмечалось, что фактическая потеря веса полиакрилатов превышала 1,77% в течение двенадцати месяцев эксперимента. Полиакрилат со временем становился рыхлым, и за время эксперимента в него проникли неорганические вещества почвы, металлы, питательные элементы, в связи с чем авторы предположили, что в конечном итоге внесенный полиакрилат может стать элементом почвы.

Абиотические факторы помогают микроорганизмам в разложении синтетических гидрогелей. Из-за поглощения УФ-излучения происходит разрыв связей амидных функциональных групп, после чего короткие отрезки полимера разрушаются микробиотой почвы. В исследовании [Смагин и др., 2014] было рассчитано, что полное разложение полиакрилатного гидрогеля произойдет при температуре 37°C за 1,8 – 4,3 года, в результате того, что эта температура является оптимумом для группы микроорганизмов, осуществляющих разложение.

Постоянные изменения температуры и влажности почвы приводят к тому, что частицы гидрогеля находятся в динамическом состоянии замораживания и оттаивания, высыхания и повторного увлажнения; обработка и уплотнение почвы способствуют образованию твердых остатков гидрогеля [Buchmann et al., 2024]. Мелкие частицы более подвижны в почве и способны переместиться в более глубокие горизонты, но при этом они подвергаются трению и истиранию, и, возможно, происходит их дальнейшая фрагментация [Buchmann et al., 2024].

В работе [Bai et al., 2015] показано как влияют свойства самих гидрогелей на биодоступность. Во-первых, линейная полиакриловая кислота в гидрогелях подвержена большей деградации, чем сшитая полиакриловая кислота, во-вторых, скорость биodeградации удваивается при уменьшении средней молекулярной массы полиакриловой кислоты на 50%.

Природные гидрогели. Природные гидрогели синтезируются на основе полисахаридов: пектина, крахмала, хитина, гуаровой камеди, целлюлозы, альгината, циклодекстрина, ксантана, хитозана, – а также лигнина, сложного полимерного соединения. Такие гидрогели нерастворимы в воде, способны поглощать большой объем воды: например, 1 г гидрогеля, синтезированного из поли(АН)-крахмала, поглощает 563 г дистиллированной воды [Холназаров и др., 2019]; 1 г сухого гидрогеля на основе альгината поглощает 55 г дистиллированной воды [Максимова и др., 2023]. В зависимости от целей использования гидрогелей выбирается более подходя-

ший природный материал и определенным образом адаптируется синтез, поэтому степень набухания гидрогелей из природных компонентов будет различаться в каждом варианте. Проблема использования только природных материалов при производстве гидрогеля заключается в том, что такой гидрогель слишком быстро подвергнется деградации и пролонгированного эффекта не будет, а это главная цель использования гидрогелей. В гидрогели на основе полисахаридов можно добавлять лигнин, его более сложная структура создает проблему для большинства микробных организмов, поэтому он позволит гидрогелю оставаться устойчивым более длительное время [Adjuik et al., 2023]. В зависимости от того, в каких пропорциях в гидрогель добавлены лигнин и, например, крахмал, можно регулировать продолжительность устойчивости к биodeградации. Если вегетационный период длится более 5 месяцев, то можно отдать предпочтение меньшему содержанию крахмала и большему содержанию лигнина; если вегетационный период длится меньше 5 месяцев, то наоборот нужно добавлять меньше лигнина и больше крахмала [Adjuik et al., 2023].

Для гидрогеля из природных компонентов не всегда возможна полная деградация любыми микроорганизмами. В работе [Leštan et al., 1998] проверялась механическая прочность гидрогелевых пленок альгината при температурном воздействии. Стерилизация проводилась в течение 10 мин при 120°C, это приводило к снижению механической прочности гелевых матриц, вероятно, из-за расщепления мономерных единиц гидрогеля, что положительно влияло на рост мицелия *Irpex lacteus*, но при этом стерилизация и pH альгинатного гидрогеля не оказали существенного влияния на рост фрагментов мицелия *Trametes versicolor*.

Полусинтетические гидрогели. Полусинтетические гидрогели синтезируются из составляющих синтетического и природного происхождения: хитозан и полиакриламид, поливиниловый спирт и крахмал и т.д. Слабым звеном в таком объединении компонентов является природное вещество. В работе [Жансенгир, Садыкова, 2023] отмечено, что при производстве гидрогеля на основе поливинилового спирта и крахмала при увеличении содержания крахмала механические свойства гидрогеля снижаются. Полусинтетические гидрогели обладают хорошей водоудерживающей способностью и за счет добавления синтетического материала более устойчивы к биоразложению, чем природные гидрогели.

При добавлении гидрогеля в почву увеличивается ее водопоглощающая способность, уменьшается частота полива за счет снижения испарения и инфильтрации, тем самым предотвращается сток воды и эрозия, а также

увеличивается аэрация почвы и микробная активность [Zohuriaan-Mehr et al., 2010]. Гидрогель используется для иммобилизации регуляторов роста растений, удобрений или защитных агентов для контролируемого высвобождения без потерь в окружающей среде. Все это способствует лучшей приживаемости саженцев древесных растений, укоренению рассады и, соответственно, увеличению биомассы необходимых культур. Гидрогели используются для рекультивации почв или, например, для улучшения песчаных почв, они придают им почти все свойства пахотных земель [Azzam, 1985].

Для чистоты эксперимента по изучению биодоступности гидрогелей необходимо исключить другие факторы воздействия. Открытым остается вопрос, как стерилизовать гидрогель, чтобы это не являлось температурным фактором воздействия [Смагин и др., 2014; Leštan et al., 1998].

Без стерилизации эксперимент может проводиться путем добавления по-разному меченых ^{13}C гидрогелей в пробы почвы. В таком случае процесс деградации измеряется с помощью оттока $^{13}\text{CO}_2$ [Wilske et al., 2014; Bai et al., 2015]. Без добавления радиоактивной метки также можно инкубировать пробы и затем измерять поток CO_2 , выделяемый в качестве конечного продукта биоминерализации, по которому можно количественно определить биодеградацию, например, лигнина и окислированного лигнина в гидрогелях [Lars et al., 2015].

Уникальной способностью к деградации лигнина и широкого спектра загрязнителей окружающей среды обладают грибы белой гнили [Bumpus et al., 1985]. Например, гриб белой гнили *Phanerochaete chrysosporium* продуцирует два типа пероксидаз, которые являются лигнин- и марганец-зависимыми. Целлобиоза дегидрогеназа является основной внеклеточной редуктазой. Эти ферменты могут использовать марганец, железо и ряд низкомолекулярных метаболитов в качестве медиаторов в последующих окислительно-восстановительных реакциях для катализа деградации загрязняющих веществ. Преимущество такого непрямого механизма окисления заключается в том, что только окислительно-восстановительные медиаторы непосредственно взаимодействуют с активными участками фермента. Непрямой механизм окисления позволяет окислять широкий спектр химических веществ, включая полимеры, поэтому использование культур грибов является еще одним перспективным способом изучения биодеградации гидрогелей [Stahl et al., 2000].

В исследовании [Phang et al., 2011] проводились испытания по биодеградации гидрогеля при погружении его в надосадочную жидкость или

почвенный раствор с добавлением питательных веществ и без. Для стимулирования биodeградации можно дополнительно вносить питательные вещества. В исследовании сравнивались процентные потери веса гидрогеля на основе альгината, включающего термоустойчивые добавки, в первые 10 дней инкубации. Были обнаружены большие различия в скорости деградации между образцами почвы с добавлением и без добавления питательных веществ. Это указывает на то, что при первом добавлении питательных веществ микроорганизмы в образце почвы стали более активными и значительно увеличились в количестве. Однако меньшие различия в скорости деградации наблюдались после 40 дней инкубации. Это было связано с конкуренцией за питательное вещество между популяциями микроорганизмов и, таким образом, подавляло скорость роста микроорганизмов, которые могут деградировать образец полимера. В результате более низкая скорость деградации может наблюдаться в образце с полимерами в присутствии питательного вещества, особенно при длительном периоде инкубации, как это было обнаружено в этом исследовании. Биodeградация оценивалась путем измерения потери веса гидрогеля.

Биodeградацию гидрогелей можно изучать с помощью прямого захоронения гидрогеля в почву [Phang et al., 2011]. В качестве материала для размещения гидрогеля можно использовать мешочки из геотекстиля. Биodeградация может оцениваться путем измерения потери веса гидрогеля в определенный промежуток времени.

Сдерживающим фактором повсеместного использования гидрогеля, в дополнение к пробелам в исследовании его разложения в почве, является его стоимость. Это будет экономически выгодно, только когда стоимость получаемой дополнительной продукции и снижение затрат на орошение превысят затраты на закупку и внесение гидрогеля. При внесении гидрогеля вместе с минеральными удобрениями повышается их эффективность. В работе [Годунова, Оганян, 2023] проведен расчёт экономической окупаемости применения гидрогеля при выращивании сельскохозяйственных культур. Отмечено, что для расширения масштабов использования гидрогеля необходимо снизить его стоимость на 30-40% для окупаемости применения хотя бы малых доз.

Выводы. Такие разные результаты исследований, представленных в обзоре, говорят о том, что в природных системах все взаимосвязано, и даже если полимеры не оказывают прямого негативного воздействия, они всегда могут проявлять косвенное влияние. Такие сети взаимодействий природных компонентов между собой очень сложны для исследования, что делает изу-

чение влияния гидрогелей на природную среду, в частности, на почву, достаточно непростой задачей. Лабораторный эксперимент, который моделирует все факторы, оказывающие влияние на гидрогели в почве в естественных условиях, создать невозможно, поэтому ученые могут проверять воздействие каждого фактора по отдельности. Следует выстроить эксперимент так, чтобы оставить один фактор и исключить другие. На сегодняшний день очевидным является то, что для применения гидрогеля в естественных условиях он должен быть полностью биодоступным. Необходимо проводить дальнейшие исследования по изучению возможных путей деградации гидрогелей в почве, потому что применение гидрогелей действительно является перспективным направлением, и точно определить, является ли такой способ улучшения свойств почвы безопасным с точки зрения защиты окружающей среды и одновременно экономически выгодным.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Асаматдинов, А.О. Влияние гидрогелей на продуктивность саженцев в различных почвах // Природопользование и охрана природы: Охрана памятников природы, биологического и ландшафтного разнообразия Томского Приобья и других регионов России: мат. IX Всерос. с межд. уч. науч.-практ. конф. Томск, 2020. С. 137-143. DOI: 10.17223/978-5-94621-954-9-2020-33.

Баканева А.А. Посадка дуба черешчатого *Quercus robur* L. однолетними и двухлетними саженцами с использованием гидрогеля // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2023. Т. 18, №. 4. С. 508-519.

Годунова Е.И., Оганян Л.Р. Экономическая эффективность применения гидрогеля в условиях неустойчивого увлажнения центрального Предкавказья // Земледелие. 2023. №. 5. С. 18-22.

Жансенгир Е., Садыкова Р. Разработка получения полимерных материалов на основе крахмала для фиторемедиации почв // Лучшая исследовательская работа 2023: сб. ст. II Межд. науч.-иссл. конкурса. Петрозаводск, 2023. С. 226-234.

Максимова Ю.Г., Горшкова А.А., Демаков В.А. Биodeградация полиакриламидов почвенной микрофлорой и штаммами амидазосодержащих бактерий // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2017. №. 2. С. 200-204.

Максимова Ю.Г., Щетко В.А., Максимов А.Ю. Полимерные гидрогели в сельском хозяйстве // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58, №. 1. С. 23-42.

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В. Биодеструкция сильнонабухающих полимерных гидрогелей и ее влияние на водоудерживающую способность почв // Почвоведение. 2014. №. 6. С. 716-723.

Смирнов А.И., Никитин В.Ф., Генералова А.А., Аксенов П.А. Приживаемость и морфологические особенности саженцев ели европейской (*Picea abies*), обработанных низкочастотным электромагнитным полем и посаженных с внесением гидрогеля // Лесной вестник / Forestry bulletin. 2021. Т. 25, №. 5. С. 22-29.

Холназаров Б.А., Тураев Х.Х., Холмуродова С.А., Джалилов А.Т. Синтез и характеристика гидрогелей на основе сополимеров крахмала // Universum: технические науки. 2019. № 11-3(68). С. 62-66.

Цепляев А.Н., Непокрытый Р.А. Энергоресурсосберегающие технологии посадки картофеля в орошаемом земледелии с использованием модернизированной картофелесажалки // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1(69). С. 472-482.

Adjuk T.A., Nokes S.E., Montross M.D. Biodegradability of bio-based and synthetic hydrogels as sustainable soil amendments: A review // Journal of Applied Polymer Science. 2023. Vol. 140, no. 12. Art. no. e53655.

Arbona V., Iglesias J.D., Jacas J., Primo-Millo E., Talon M., Gomez-Cadenas A. Hydrogel Substrate Amendment Alleviates Drought Effects on Young Citrus Plants // Plant and Soil. 2005. Vol. 270, no. 1. P. 73-82.

Azzam R.A.I. Tailoring polymeric gels for soil reclamation and hydroponics // Communications in soil science and Plant Analysis. 1985. Vol. 16, no. 10. P. 1123-1138.

Bai M., Wilske B., Buegger F., Esperschütz J., Bach M., Frede H.-G., Breuer L. Relevance of nonfunctional linear polyacrylic acid for the biodegradation of superabsorbent polymer in soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. Vol. 22. P. 5444-5452. DOI: 10.1007/s11356-014-3772-0.

Buchmann C., Neff J., Meyer M., Bundschuh M., Steinmetz Z. Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics? // Cambridge Prisms: Plastics. 2024. Vol. 2. No. e3. P. 1-14.

Bumpus J.A., Tien M., Wright D., Aust S.D. Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus // Science. 1985. Vol. 228, no. 4706. P. 1434-1436.

Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F., Paulino A.T., Davi M.F., Rubira A.F., Muniz E.C. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review // European Polymer Journal. 2015. Vol. 72. P. 365-385.

Lars P., Till H., Ernst B., Gisela C., Sascha L., Ute H. Biodegradation of Hydrogels from Oxyethylated Lignins in Model Soils // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2015. Vol. 3, iss. 9. P. 1955-1964.

Leštan D., Leštan M., Lamar R.T. Growth and viability of mycelial fragments of white-rot fungi on some hydrogels // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 1998. Vol. 20, no. 3-4. P. 244-250.

Liang D., Du C., Ma F., Shen Y., Wu K., Zhou J. Degradation of polyacrylate in the outdoor agricultural soil measured by FTIR-PAS and LIBS // Polymers. 2018. Vol. 10, iss. 12. Art. no. 1296. DOI: 10.3390/polym10121296.

Matsuoka H., Ishimura F., Takeda T., Hikuma M. Isolation of polyacrylamide-degrading microorganisms from soil // *Biotechnology and bioprocess engineering*. 2002. Vol. 7. P. 327-330.

Nyyssola A., Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2019. Vol. 139. P. 24-33.

Ostrand M.S., DeSutter T.M., Aaron L.M.D., Limb R.F., Steele D.D. Superabsorbent polymer characteristics, properties, and applications // *Agrosystems, Geosciences & Environment*. 2020. Vol. 3, no. 1. Art. no. e20074.

Oksinska M.P., Magnucka E.G., Lejcus K., Jakubiak-Marcinkowska A., Ronka S., Trochimczuk A.W., Pietr S.J. Colonization and biodegradation of the cross-linked potassium polyacrylate component of water absorbing geocomposite by soil microorganisms // *Applied Soil Ecology*. 2019. Vol. 133. P. 114-123.

Phang Y.N., Chee S.Y., Lee C.O., Teh Y.L. Thermal and microbial degradation of alginate-based superabsorbent polymer // *Polymer degradation and stability*. 2011. Vol. 96, no. 9. P. 1653-1661.

Saha A., Rattan B., Sekharan S., Manna U. Quantifying the combined effect of pH and salinity on the performance of water absorbing polymers used for drought management // *Journal of Polymer Research*. 2021. Vol. 28. P. 1-14.

Silva J.S., Braulio C.D.S., Jesus D.S.D., Leite E.D.S., Nóbrega R.S.A., Martins R.P., Nóbrega J.C.A. Hydrogel associated with soil moisture levels in the cultivation of *Eucalyptus urograndis* // *Ciência Florestal*. 2024. Vol. 34. Art. no. e73403.

Stahl J.D., Cameron M.D., Haselbach J., Aust S.D. Biodegradation of superabsorbent polymers in soil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2000. Vol. 7. P. 83-88.

Wilske B., Bai M., Lindenstruth B., Bach M., Rezaie Z., Frede H.-G., Breuer L. Biodegradability of a polyacrylate superabsorbent in agricultural soil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21. P. 9453-9460.

Zohuriaan-Mehr M.J., Omidian H., Doroudiani S., Kabiri K. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials // *Journal of materials science*. 2010. Vol. 45. P. 5711-5735.

Reference

Adjuik T.A., Nokes S.E., Montross M.D. Biodegradability of bio-based and synthetic hydrogels as sustainable soil amendments: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 140, no. 12, art. no. e53655.

Arbona V., Iglesias J.D., Jacas J., Primo-Millo E., Talon M., Gomez-Cadenas A. Hydrogel Substrate Amendment Alleviates Drought Effects on Young Citrus Plants. *Plant and Soil*, 2005, vol. 270, no. 1, pp. 73–82.

Asamatdinov A. O. Influence of hydrogels on the productivity of seedlings in various soils. *Nature management and environmental protection: protection of natural*

monuments, biological and landscape diversity of the Tomsk Priobye and other regions of Russia: Proceedings of the IX All-Russ. sci.-pract. conf. with int. part. Tomsk, 2020, pp. 137-143. DOI: 10.17223/978-5-94621-954-9-2020-33. (In Russ.)

Azzam R.A.I. Tailoring polymeric gels for soil reclamation and hydroponics. *Communications in soil science and Plant Analysis*, 1985, vol. 16, no. 10, pp. 1123-1138.

Bai M., Wilske B., Buegger F., Esperschütz J., Bach M., Frede H.-G., Breuer L. Relevance of nonfunctional linear polyacrylic acid for the biodegradation of superabsorbent polymer in soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2015, vol. 22, pp. 5444–5452. DOI: 10.1007/s11356-014-3772-0.

Bakaneva A.A. Planting pedunculate oak (*Quercus robur* L.) with one-year-old and two-year-old seedlings using hydrogel. *RUDN: Journal of Agronomy and animal Industries*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 508-519. (In Russ.)

Buchmann C., Neff J., Meyer M., Bundschuh M., Steinmetz Z. Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics? *Cambridge Prisms: Plastics*, 2024, vol. 2, no. e3, pp. 1-14.

Bumpus J.A., Tien M., Wright D., Aust S.D. Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus. *Science*, 1985, vol. 228, no. 4706, pp. 1434-1436.

Godunova E.I., Oganyan L.R. Economic efficiency of hydrogel application under unstable moisture conditions in the Central Ciscaucasia. *Agriculture*, 2023, no. 5, pp. 18-22. (In Russ.)

Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F., Paulino A.T., Davi M.F., Rubira A.F., Muniz E.C. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 2015, vol. 72, pp. 365-385.

Kholnazarov B.A., Turaev K.Kh., Kholmurodova S.A., Jalilov A.T. Synthesis and characterization of hydrogels based on starch copolymers. *Universum: Technical Sciences*, 2019, no. 11-3(68), pp. 62–66. (In Russ.)

Lars P., Till H., Ernst B., Gisela C., Sascha L., Ute H. Biodegradation of Hydrogels from Oxyethylated Lignins in Model Soils. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2015, vol. 3, iss. 9, pp. 1955-1964.

Leštan D., Leštan M., Lamar R.T. Growth and viability of mycelial fragments of white-rot fungi on some hydrogels. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1998, vol. 20, no. 3-4, pp. 244-250.

Liang D., Du C., Ma F., Shen Y., Wu K., Zhou J. Degradation of polyacrylate in the outdoor agricultural soil measured by FTIR-PAS and LIBS. *Polymers*, 2018, vol. 10, iss. 12, art. no. 1296. DOI: 10.3390/polym10121296.

Maksimova Y.G., Gorshkova A.A., Demakov V.A. Biodegradation of polyacrylamides by soil microflora and amidase-containing bacterial strains. *Perm University Bulletin. Biology Series*, 2017, no. 2, pp. 200-204. (In Russ.)

Maksimova Y. G., Shchetko V. A., Maksimov A. Y. Polymer hydrogels in agriculture. *Agricultural Biology*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 23–42. (In Russ.)

Matsuoka H., Ishimura F., Takeda T., Hikuma M. Isolation of polyacrylamide-degrading microorganisms from soil. *Biotechnology and bioprocess engineering*, 2002, vol. 7, pp. 327-330.

Nyyssola A., Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, vol. 139, pp. 24-33.

Oksinska M.P., Magnucka E.G., Lejcus K., Jakubiak-Marcinkowska A., Ronka S., Trochimeczuk A.W., Pietr S.J. Colonization and biodegradation of the cross-linked potassium polyacrylate component of water absorbing geocomposite by soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 2019, vol. 133, pp. 114-123.

Ostrand M.S., DeSutter T.M., Aaron L.M.D., Limb R.F., Steele D.D. Superabsorbent polymer characteristics, properties, and applications. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2020, vol. 3, no. 1, art. no. e20074.

Phang Y.N., Chee S.Y., Lee C.O., Teh Y.L. Thermal and microbial degradation of alginate-based superabsorbent polymer. *Polymer degradation and stability*, 2011, vol. 96, no. 9, pp. 1653-1661.

Saha A., Rattan B., Sekharan S., Manna U. Quantifying the combined effect of pH and salinity on the performance of water absorbing polymers used for drought management. *Journal of Polymer Research*, 2021, vol. 28, pp. 1-14.

Silva J.S., Braulio C.D.S., Jesus D.S.D., Leite E.D.S., Nóbrega R.S.A., Martins R.P., Nóbrega J.C.A. Hydrogel associated with soil moisture levels in the cultivation of *Eucalyptus urograndis*. *Ciência Florestal*, 2024, vol. 34, art. no. e73403.

Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Smagina M.V. Biodestruction of superabsorbent polymer hydrogels and its impact on the water retention capacity of soils. *Soil Science*, 2014, no. 6, pp. 716-723. (In Russ.)

Smirnov A.I., Nikitin V.F., Generalova A.A., Aksenov P.A. Survival and morphological features of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings treated with a low-frequency electromagnetic field and planted with hydrogel application. *Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 22-29. (In Russ.)

Stahl J.D., Cameron M.D., Haselbach J., Aust S.D. Biodegradation of superabsorbent polymers in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2000, vol. 7, pp. 83-88.

Tseplyaev A.N., Nepokryty R.A. Energy- and resource-saving technologies for planting potatoes in irrigated agriculture using a modified potato planter. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University complex: science and higher professional education*, 2023, no. 1(69), pp. 472-482. (In Russ.)

Wilske B., Bai M., Lindenstruth B., Bach M., Rezaie Z., Frede H.-G., Breuer L. Biodegradability of a polyacrylate superabsorbent in agricultural soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol. 21, pp. 9453-9460.

Zhansengir E., Sadykova R. Development of polymer materials based on starch for phytoremediation of soils. *Best research work 2023: Proceedings of the II International Research Competition. Petrozavodsk, 2023*, pp. 226–234. (In Russ.)

Zohuriaan-Mehr M.J., Omidian H., Doroudiani S., Kabiri K. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. *Journal of materials science*, 2010, vol. 45, pp. 5711–5735.

Материал поступил в редакцию 15.12.2024

Пожарская О.Д., Хомяков Ю.В. Свойства гидрогелей и факторы внешней среды, влияющие на скорость их деградации // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 198–212. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.198-212*

Водный дефицит является глобальной проблемой для многих сфер деятельности, включая сельское хозяйство и лесомелиоративные работы, которые необходимы для улучшения водного режима почв, уменьшения эрозии и увеличения содержания органического вещества в почве. Сельское хозяйство и лесомелиорация нуждаются в технологиях улучшения водообеспеченности культур и саженцев после пересадки. В качестве такой технологии используют суперабсорбирующие полимеры, или гидрогели. Область применения гидрогелей достаточно широкая: помимо перечисленного, они используются в медицине, строительстве, для очистки сточных вод и рекультивации. Находясь в корнеобитаемом слое, гидрогель накапливает влагу, а затем продолжительное время высвобождает ее, тем самым поддерживая водный баланс прикорневой зоны. Необходимо понимать, что гидрогель, внесенный в почву, остается там настолько, насколько он устойчив к микробиологическому разложению. При этом, оставаясь в почве, гидрогель может утратить свои свойства набухания, то есть потенциально может храниться в почве долгое время, потеряв свои свойства, и придется добавлять новую дозу гидрогеля. Учитывая продолжающееся применение гидрогеля и его постоянное попадание в окружающую среду, особенно в почву, крайне важно знать об устойчивости гидрогелей к биodeградации. Поскольку наше текущее понимание фрагментации гидрогелей в почве ограничено и часто основано на теоретических соображениях, крайне важно исследовать конкретные условия окружающей среды, а также свойства самих гидрогелей, которые определяют его судьбу в почве и его влияние на функционирование экосистемы.

Ключевые слова: водный дефицит, гидрогель, почва, микроорганизмы, биodeградация.

Pozharskaya O.D., Khomyakov Yu.V. Properties of Hydrogels and Environmental Factors Affecting Their Degradation Rate. *Izvestia Sankt-*

Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii, 2025, iss. 256, pp. 198–212 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.198-212

Water scarcity represents a critical global issue for many areas of activity, including agriculture and forest reclamation, both of which are pivotal for optimizing soil water regimes, mitigating erosion and enhancing soil organic matter content. For instance, forest reclamation activities require advanced technologies to improve water availability for transplanted seedlings. One such approach involves the application of superabsorbent polymers, commonly referred to as hydrogels. Hydrogels exhibit a broad spectrum of applications, spanning medicine, agriculture, construction, wastewater treatment, and land reclamation. Within the root zone, hydrogels function as moisture reservoirs, absorbing water and releasing it gradually over extended periods, thereby stabilizing the water balance in the rhizosphere. However, it is critical to acknowledge that once introduced into the soil, hydrogels persist for a duration dictated by their resistance to microbial degradation. Over time, they may lose their swelling capacity, potentially remaining in the soil in a degraded state, necessitating the periodic supplementation of new hydrogel doses. Given the continued utilization of hydrogels and their recurrent introduction into the environment, particularly into soils, it is imperative to evaluate their resistance to biodegradation. Considering that our current knowledge regarding hydrogel fragmentation in soils is limited and predominantly theoretical, it is essential to investigate specific environmental conditions and properties of the hydrogels themselves, that govern the fate of hydrogels in soil systems and their implications for ecosystem functionality.

Key words: water scarcity, hydrogel, soil, microorganisms, biodegradation.

ПОЖАРСКАЯ Олеся Дмитриевна – аспирант кафедры общей экологии, анатомии и физиологии растений Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;

младший научный сотрудник Санкт-Петербургского научного центра РАН.
ORCID: 0000-0003-2091-905X.

199034, Университетская наб., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: olesyapozharskaya@yandex.ru

POZHARSKAYA Olesya D. – PhD student of the Ecology, Anatomy and Physiology of Plants Department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia;

research assistant of St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Science. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

199034. Universitetskaya emb. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: olesyapozharskaya@yandex.ru

ХОМЯКОВ Юрий Викторович – доцент кафедры общей экологии, анатомии и физиологии растений Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;

заведующий лабораторией биохимии почвенно-растительных систем Агрофизического НИИ. AuthorID: 601515.

195220, Гражданский пр., д. 14, Санкт-Петербург, Россия.

KHOMYAKOV Yuriy V. – Associate Professor of the Ecology, Anatomy and Physiology of Plants Department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia;

head of the Laboratory of Biochemistry of Soil and Plant Systems of the Agrophysical Research Institute.

195220, Grazhdanskiy av. 14, St. Petersburg, Russia.