

ПОЛИМЕРНЫЙ ГЕЛЬ-СУБСТРАТ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАСТЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВОГО САЛАТА

Г. Г. Панова¹, Е. Л. Краснопева², С. М. Лаишевкина², Т. Э. Кулешова¹, О. Р. Удалова¹, Ю. В. Хомяков¹,
В. Е. Вертебный¹, А. В. Якиманский²

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14,

E-mail: gaiane@inbox.ru; www.piter.ru@bk.ru; himlabafi@yandex.ru; verteb22@mail.ru;

²НИЦ «Курчатовский Институт» – Институт высокомолекулярных соединений

(НИЦ «Курчатовский Институт» – ИВС),

199004, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 31,

E-mail: opeeva@gmail.com; s.laishevkina@gmail.com; yakimansky@yahoo.com

Поступила в редакцию 12.07.2023, принята к печати 31.08.2023

В процессе криотропного гелеобразования при сополимеризации 3-сульфопропилметакрилата калия (СПМА) с 2-гидроксиэтилметакрилатом (ГЭМА) (СПМА-со-ГЭМА) синтезирован гидрогель, на основе которого создан гель-субстрат с необходимыми для растений макро- и микроэлементами. В серии лабораторных и вегетационных экспериментов, проведенных в регулируемых условиях интенсивной светокультуры, установлено, что созданный гидрогель с и без макро- и микроэлементов обладает выраженными сорбционными свойствами, высокой набухаемостью и обеспечивает благоприятные условия для прорастания семян и роста растений на ранних этапах их развития. Физиологическое состояние растений улучшилось при их выращивании на гель-субстратах методом паноупонии в сравнении с вариантами без их использования, а именно: отмечено увеличение емкости и повышение эффективности работы фотосинтетического аппарата, стабилизация работы антиоксидантных систем, обогащение листьев необходимыми растениям макро- и/или микроэлементами, что в конечном итоге обеспечило наблюдаемые значимые положительные изменения показателей роста и продуктивности растений, а также качества и безопасности формируемой растительной продукции, в частности увеличение содержания в ней сахаров, витамина С, макро- и микроэлементов и преимущественное снижение содержания нитратов. Наиболее существенные изменения состояния растений салата отмечались при присутствии в корнеобитаемой зоне гель-субстрата, обогащенного макро- и микроэлементами. Высокая эффективность гель-субстратов подчеркивает перспективность дальнейших углубленных исследований механизмов их влияния на культурные растения.

Ключевые слова: гидрогель, биологическая активность, салат, хлорофиллы, каротиноиды, флуоресценция, интенсивность перекисного окисления липидов, пероксидаза, каталаза, рост, химический состав.

POLYMER GEL-SUBSTRATE AND ITS INFLUENCE ON PLANTS ON EXAMPLE OF LEAF SALAD

G. G. Panova¹, E. L. Krasnopeva², S. M. Laishevkina², T. E. Kuleshova¹, O. R. Udalova¹, Yu. V. Khomyakov¹,
V. E. Vertebnyy¹, A. V. Yakimanskiy²

Agrophysical Research Institute,

14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia,

E-mail: gaiane@inbox.ru; www.piter.ru@bk.ru; himlabafi@yandex.ru; verteb22@mail.ru;

²SRC «Kurchatov Institute» – Institute of Macromolecular Compounds (SRC «Kurchatov Institute» – IMC),

31, Bolshoy prospect of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199004,

E-mail: opeeva@gmail.com; s.laishevkina@gmail.com; yakimansky@yahoo.com

In the process of cryotropic gel formation during the copolymerization of potassium 3-sulfopropyl methacrylate (SPMA) with 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) (SPMA-co-HEMA), a hydrogel was synthesized. On the basis of this hydrogel, a gel substrate with macro- and microelements necessary for plant growth was created. In a series of laboratory and vegetation experiments conducted under controlled conditions of intensive light culture, it was established that the created hydrogel with or without macro- and microelements, having pronounced sorption properties and high swelling capacity, ensured favorable conditions for seed germination and plant growth in the early stages of their development. The physiological state of plants improved when they were grown on the gel substrates (using the panoponic method) in comparison with the treatments where the gel was not used: there was an increase in the capacity and efficiency of the photosynthetic apparatus; stabilization of the antioxidant systems work; enrichment of leaves with macro- and/or microelements necessary for plant growth. These changes provided significant positive changes in plant growth and productivity, as well as in the quality and safety of crops. In particular there was an increase in the content of sugars, vitamin C, macro- and microelements, and a predominant

decrease in the content of nitrates. The most significant changes in the state of lettuce plants were observed when the gel substrate enriched with macro- and microelements was present in the root zone. The high efficiency of the gel substrates emphasizes the prospects for further in-depth studies of the mechanisms of their influence on cultivated plants.

Key words: hydrogel, biological activity, lettuce, chlorophylls, carotenoids, fluorescence, intensity of lipid peroxidation, peroxidase, catalase, growth, chemical composition.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка системы многомерной оптимизации условий жизнеобеспечения растений и агротехнологий их культивирования с учетом физиологических особенностей сортов и гибридов является приоритетной фундаментальной научно-исследовательской задачей, выполнение которой может быть осуществлено только в условиях регулируемой агроэкосистемы (РАЭС) (Ермаков, 2009). Физическое моделирование почвенно-растительных систем и процессов в сочетании с возможностями круглогодичного интенсивного выращивания растений при широком варьировании свето-температурных условий и эдафических факторов в РАЭС является основой для получения знаний об особенностях продукционного процесса растений и механизмах их взаимодействия со средой обитания.

К настоящему времени вопросы оптимизации состава и свойств корнеобитаемой и световой среды растений в условиях защищенного грунта остаются нерешенными. Такая оптимизация представляет собой многокомпонентную задачу с несколькими переменными, зависящими от задаваемых условий, от продукционного и адаптационного потенциала выращиваемого сорта или гибрида овощной культуры. Известные и широко используемые в растениеводстве защищенного грунта природные минеральные, органические и синтетические материалы для выращивания растений не вполне соответствуют требованиям к корнеобитаемым средам, обеспечивающим оптимальные условия для их роста и развития на протяжении всего онтогенеза (Ермаков, 2009; Rapova et al., 2020). В связи с этим создание новых материалов, обладающих необходимыми свойствами и имеющих известную стабильную структуру, а также способных при соприкосновении с водой переходить из легкой по весу твердой формы в гелеобразную пористую, устойчивую к условиям интенсивной светокультуры, является весьма актуальным, а сами такие материалы будут довольно перспективными для широкого производственного использования.

Зародившееся в 1932 году в Агрофизическом научно-исследовательском институте учение об искусственных структурообразующих веществах, улучшающих свойства почв и почвозаменителей (Вершинин, 1958), активно развивалось в нашей стране и за рубежом (Ламан и др., 2010; Dehkordi, 2018; Dwivedi, 2021; Elshafie, Camele, 2021 и др.). За почти 90-летний период исследований накоплен ценный экспериментальный материал, свидетельствующий о том, что применение синтетических полимерных структурообразователей может оказаться весьма эффективным при создании искусственных субстратов для защищенного грунта (Ламан и др., 2010; Dehkordi,

2018; Elshafie, Camele, 2021). В таком случае точные сведения о минералогическом составе смешиваемых компонентов, их дисперсности, содержании макро- и микроэлементов, в том числе полутвердых окислов металлов, кислотности, возможность легко оптимизировать указанные параметры и осуществлять подбор наиболее подходящего полимера в зависимости от химической природы, молекулярной массы, пространственной структуры и наличия функциональных радикалов в полимерных цепях будут обеспечивать не только высокую эффективность структурообразования и использования субстрата для повышения продуктивности выращиваемых растений, но и стабильность результатов от опыта к опыту.

Особенно интересны в данном отношении гидрогели, принадлежащие к классу полимеров, обладающих высоким водопоглощением и способностью удерживать влагу в больших количествах (от сотен до тысяч раз превышающих их собственную массу), которые получили название суперпоглощающих полимеров (СПП) (Ai et al., 2021). По своему происхождению СПП могут быть природными, синтетическими или гибридными, а по структуре сшивок они делятся на сетки с ковалентными химическими связями и сетки физических зацеплений (Milani et al., 2017).

Появление гидрогелей на основе СПП для кондиционирования почвы восходит к 1980-м годам, когда появились первые патенты, описывающие применение гидрогелей. Эриксон (Erickson, 1984) запатентовал метод улучшения удержания воды и аэрационной способности почвенных матриц за счет помещения в почву полимерных пленок полиметакрилатов, характеризующихся водонабуханием. В работе (Callaghan et al., 1988) были протестированы полиакриламид и поливиниловый спирт в качестве супервпитывающих полимеров, применяемых для увлажнения пораженных засухой почв в Судане. Авторы доказали, что поливиниловый спирт после введения в песчаную почву позволяет существенно увеличить ее водоудерживающую способность, причем оба полимера способствовали увеличению продолжительности жизни растений. Авторы (Woodhouse, Johnson, 1991) продемонстрировали, что использование сополимера крахмала благоприятно влияет на рост ячменя и салата в почвах, увеличивая период до достижения точки увядания. Авторы работы (Islam et al., 2011) показали, что использование гранулированного полиакриламида для кондиционирования почвы позволяет не только улучшить условия орошения, но и стабилизировать работу антиоксидантных систем растений, что благоприятно отражается на росте растений даже при более низких уровнях орошения (Islam et al., 2011). В работе (Sharma et al., 2014) описан синтез взаимопроникающих полимерных сеток на основе

полиаспарагиновой кислоты, важной характеристикой которой является повышенная способность к биоразложению. В работе (Cannazza et al., 2014), в свою очередь, применялись СПП на основе целлюлозы как экологически чистой альтернативы акрилатной основе СПП. Авторы (Dragan, 2014) описали гидрогели, построенные из взаимопроникающих полимерных сеток на основе таких биополимерных материалов, как хитозан, альгинат, крахмал и другие полисахариды.

Для сравнения эффективности природных и синтетических полимеров в оптимизации гидрофизических свойств почвы в работе (Liang et al., 2007) были синтезированы и протестированы три различных гидрогеля: 1) на основе поливинилового спирта; 2) на основе комбинации поливинилового спирта и хитозана; 3) из хитозана. Установлено, что гидрогель из чистого поливинилового спирта способствовал наиболее выраженному улучшению гидрофизических свойств почвы. Таким образом, использование синтетических гидрогелей, к которым относятся и разработанные в НИЦ «Курчатовский Институт» - ИВС гидрогели на основе сополимеров 3-сульфопропилметакрилата, широко освещается в современных исследованиях по изучению применения СПП для увеличения водоудерживающей способности почв. Однако в настоящее время в научной литературе имеются только три работы, посвященные потенциальному использованию полимеров с сульфокислотными группами для сельскохозяйственных нужд (Xu et al., 2019; Gala et al., 2021; Laishchikina et al., 2023). Таким образом, синтез и изучение указанных гидрогелей представляются совершенно новым и актуальным направлением исследований.

Создание устойчивого экологически безопасного гель-субстрата, содержащего необходимые для растений элементы питания, источники энергии и физиологически активные вещества с протекторными свойствами, особенно на

начальных этапах их развития, является приоритетным направлением научно-исследовательской работы.

Для решения указанной фундаментальной задачи усилиями коллектива специалистов ИВС РАН и ФГБНУ АФИ проводится исследовательская работа по созданию и испытанию новых гель-субстратов на основе сополимеров 3-сульфопропилметакрилата и 2-гидроксиэтилметакрилата, характеризующихся высоким водопоглощением.

Гипотеза: использование гидрогеля на основе сополимеров 3-сульфопропилметакрилата и 2-гидроксиэтилметакрилата обеспечит формирование субстрата, необходимого для прорастания семян и роста растений на ранних этапах развития, а включение в его состав макро- и микроэлементов, необходимых для роста и развития растений, существенно улучшит полезные свойства гидрогеля, что будет способствовать повышению выживаемости и конкурентоспособности растений на ранних и последующих этапах их развития

Цель данной работы – изучить влияние полимерного гель-субстрата на растения на примере листового салата для оценки возможности его применения в растениеводстве закрытого грунта.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Предметом исследования являлось влияние на растения гидрогелей, которые были синтезированы в процессе криотропного гелеобразования при сополимеризации 3-сульфопропилметакрилата калия (СПМА) с 2-гидроксиэтилметакрилатом (ГЭМА) (СПМА-со-ГЭМА). Схема синтеза представлена на рис. 1.

В табл. 1 перечислены условия синтеза и характеристики полученного гидрогеля. Реакция проводилась при температуре -18°C . Криотропное гелеобразование было выбрано в качестве метода синтеза благодаря возможности формирования гелей с сильнопористой структурой.

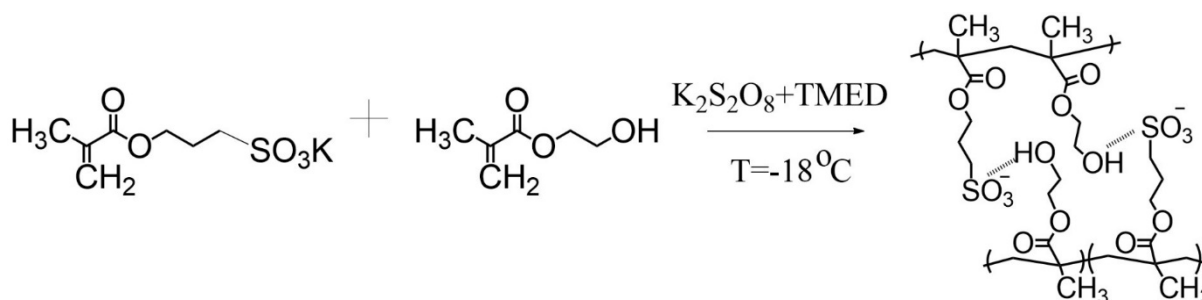


Рис. 1. Схема синтеза гидрогеля на основе СПМА-со-ГЭМА

Таблица 1. Условия синтеза и характеристики полученных гелей на основе СПМА

Образец	$C_{\text{мон}}$, моль л ⁻¹	SO_3 , 10^{-3} моль-экв г ⁻¹	Степень набухания, мл г ⁻¹
(СПМА-со-ГЭМА)	0,5	2,15	205

Примечание: $C_{\text{мон}}$ – сомономер; СПМА/сомономер = 50/50 (моль).

Были выбраны следующие условия формирования гидрогелей: концентрация мономеров – 0,5 моль л⁻¹; соотношение СПМА и ГЭМА – 1:1; время реакции – 24 часа. Полученные гель-субстраты на основе полимеров СПМА-со-ГЭМА до набухания имеют крупные поры диаметром 50–250 мкм, оставшиеся на месте кристаллов льда. Толщина стенок такого гидрогеля составляет 5–10 мкм. После установления состояния равновесного набухания для

гидрогелей характерны взаимопроникающие поры диаметром 150–400 мкм. Кроме того, после набухания толщина полимерных стенок снижается до 1–5 мкм.

Синтез гидрогелей осуществлялся по методологии, описанной в (Laishevskina et al., 2023). Состав макро- и микроэлементов, вводимых в модифицированный гидрогель на основе СПМА-со-ГЭМА, представлен в табл. 2.

Таблица 2. Содержание макро-и микроэлементов в гель-субстрате

Содержание	Элементы в питательном растворе											
	NH ₄	K	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu
моль μмоль	1,78	0,350	0,340	0,100	0,885	0,103	0,140	1,780	0,789	0,070	0,468	0,080

Оценка биологической активности и оптимальной для роста растений концентрации гель-субстрата при проращивании семян фитотест-объекта

Для проведения оценки использовалась суспензия гидрогеля на основе СПМА-со-ГЭМА, разведенная дистиллированной водой в соотношениях: 1:200; 1:300; 1:400; 1:500; 1:600 г мл⁻¹. Фитотест-объектом служили семена кресс-салата сорта Ажур из коллекции ФГБНУ ФИЦ ВИР.

Семена проращивались на протяжении семи суток в чашках Петри на инертном гидрофильном материале, обеспечивающим равномерное поступление периодически вносимой дистиллированной воды (в 1-е, 3-е, 5-е-7-е сутки по 5 мл на стандартную чашку Петри) к корням проростков. В вариантах опыта суспензия гидрогеля (ГГ) наносилась тонким слоем толщиной 1 мм на поверхность гидрофильного материала, являющегося тонкослойным аналогом почвы (ТАП) – ТАП + ГГ, после чего семена распределялись по площади материала с гелем. Контролем служил вариант без нанесения суспензии гидрогеля. Эталонным контролем являлся вариант с нанесением на материал суспензии кембрийской глины (ТАП + СГ) тонким слоем (1 мм).

Биологическая активность синтезированных гидрогелей определялась в лабораторных условиях при температуре воздуха +22...+24°C и влажности воздуха 60±5% по показателям прорастания семян и роста проростков кресс-салата. Исследование проводилось в соответствии с правилами международной ассоциации (ISTA) и российским стандартом (ГОСТ 12038-84, 1985). На третий день после посева семян определялась энергия прорастания, на седьмые сутки – оценивалась их всхожесть, а также измерялись длина ростков и корней, биомасса ростков и содержание в них сухого вещества. Опыт проводился в трехкратной повторности, число семян на вариант составляло 400 штук.

Изучение влияния созданного гель-субстрата на физиологические процессы роста, развития и формирования продуктивности растений на примере листового салата, качественные характеристики растительной продукции

Вегетационные эксперименты проводились в регулируемых условиях интенсивной светокультуры

на агробиополигоне Агрофизического научно-исследовательского института. Использовались гель-субстраты на основе сополимеров СПМА-со-ГЭМА без и с обогащением макро- и микроэлементами. Гидрогель разводился водой в соотношении 1:500, при котором отмечается его положительное воздействие на растения на ранних этапах их развития. Объектом исследований служили растения салата сорта Тайфун производства АОССПП «Сортсеменовощ».

Растения выращивались в вегетационно-облучательных установках (Panova et al., 2020), оснащенных подъемными световыми блоками. В качестве источника света использовались зеркализированные натриевые лампы высокого давления ДНаЗ-400 (ООО «Рефлекс», Россия) с формированием облученности на полезной площади в области ФАР 80–90 Вт м⁻². Продолжительность светового периода составляла 14 часов. Растения выращивались методом тонкослойной панопоники (Пат. РФ № 189309, 2019). Источником макро- и микроэлементов являлся питательный раствор Кнопа. Температура воздуха поддерживалась в пределах +22...+24°C в световой период и +18...+20°C – в темновой период, относительная влажность воздуха – на уровне 65–75%. Плотность ценоза формировалась из расчета 40 растений салата на 1 м² полезной площади вегетационной светоустановки. Длительность эксперимента составляла 28 суток от посева.

В вегетативный период развития в листьях растений определялись:

– показатели емкости фотосинтетического аппарата – по содержанию фотосинтетических пигментов: хлорофиллов а и b, каротиноидов (Методы..., 1987);

– эффективность работы фотосинтетического аппарата – по параметрам флуоресценции, которые измерялись с помощью импульсного флуориметра MINI-PAM-II (Heinz Walz, Германия) в соответствии со стандартной методикой (MINI-PAM-II Руководство..., 2018). С использованием специального программного обеспечения WinControl-3 рассчитывались следующие параметры флуоресценции: максимальный фотохимический квантовый выход FV/FM; эффективный фотохимический квантовый выход Y(II) и его сопутствующие параметры – регулируемые Y(NPQ) и

нерегулируемые $Y(NO)$ потери энергии возбуждения; коэффициенты фотохимического (qL , qP) и нефотохимического (qN , NPQ) тушения;

– активность работы антиоксидантных систем растений – по активности окислительно-восстановительных ферментов каталаза, пероксидаза (Методы..., 1987; Починок, 1976), а также по интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) (Purvid et al., 1995);

– содержание основных макро- и микроэлементов (Методы..., 1987; Руководство..., 1998).

При уборке салата учитывались высота растений, диаметр растений, число листьев, сырая, сухая масса, процент сухого вещества в листьях, стеблях и корнях, площадь листовой поверхности. Также определялись общепринятые показатели качества и безопасности растительной продукции (Методы..., 1987; Руководство..., 1998).

Статистическая обработка результатов проведенных исследований проводилась с применением программ Excel 2016 и Statistica 8 («Stat-Soft, Inc.» США). Определялись средние значения изучаемых показателей, доверительные интервалы, коэффициент корреляции. Достоверность различий между вариантами оценивалась с помощью методов параметрической (t-критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считались достоверными при $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водопоглощение синтезированных гель-субстратов

Полученные гель-субстраты на основе полимеров СПМА-со-ГЭМА благодаря высокому содержанию ионогенных групп (содержание $-SO_3^-$ составляет $2,67 \cdot 10^{-3}$ моль-экв $г^{-1}$) характеризуются высокими сорбционными свойствами – 650 ± 120 мл $г^{-1}$ для дистиллированной воды. При этом показатели сорбции снижаются при использовании солевых растворов: 65 ± 15 г $г^{-1}$ для 0,9% NaCl и 85 ± 23 г $г^{-1}$ для раствора Кнопа.

Благодаря сильно развитой пористой структуре гель-субстраты на основе полимеров СПМА-со-ГЭМА характеризуются взрывным набуханием, т. е. более 90% воды абсорбируется менее чем за 10–15 минут. При комнатной температуре для гель-субстратов на основе полимеров СПМА-со-ГЭМА характерна быстрая потеря влаги (1,3% от общего содержания воды в час), что приводит к необходимости их увлажнения не реже одного раза в два дня. Используемая для выращивания растений технология панопоники, обеспечивает постоянное поступление влаги по щелевым капиллярам в место нанесения геля и способствует минимизации потери влаги гель-субстратами.

Оценка биологической активности гель-субстрата при проращивании семян фитотест-объекта и определение его оптимальной концентрации для роста растений

В серии лабораторных экспериментов, направленных на изучение влияния созданного гель-субстрата на основе СПМА-со-ГЭМА на энергию прорастания, всхожесть семян, показатели роста (длина ростков и корней, масса проростков) фитотест-культуры (кресс-салата сорта Ажур) (табл. 3 и 4), установлено:

– отсутствие достоверных изменений показателей энергии прорастания и всхожести семян в вариантах с разведением гель-субстратов водой в изучаемых соотношениях по сравнению с контролем и эталоном;

– отсутствие отличий от эталонного варианта и положительное стимулирующее влияние в виде тенденции или достоверное влияние относительно контроля на морфометрические показатели роста (длина ростка и корня), что наиболее характерно для варианта с гель-субстратом, разведенным в соотношении 1:500 (на 20% и 47% соответственно), и наименее – для варианта с гель-субстратом, разведенным в соотношении 1:600;

– слабая тенденция к увеличению сырой массы 100 проростков (на 3–9%) в вариантах с гель-субстратами и несколько более выраженная в варианте с гель-субстратом, разведенным в соотношении 1:500; отсутствие отличий от контроля по показателям сухой массы 100 проростков и процентному содержанию в них сухого вещества. Это позволяет предположить, что выявленные тенденции к повышению сырой массы проростков в вариантах с гель-субстратами, разведенными в соотношениях 1:200–1:500, обусловлены преимущественно увеличением длины ростков и корней и не связаны с накоплением в них сухого вещества.

Полученные данные свидетельствуют о высокой биологической активности гидрогелей, присутствие которых вокруг порастающих семян, очевидно, способствует активации метаболизма и интенсификации ростовых линейных процессов на ранних этапах развития растений. Наиболее выраженное положительное влияние на морфометрические (сравнимые с эталонным вариантом) и весовые характеристики роста проростков оказал гель-субстрат, разведенный в соотношении 1:500, что дало основание выбрать данный вариант разведения для последующих агробиологических испытаний гель-субстрата, проводимых с его обогащением макро- и микроэлементами и без него.

Таблица 3. Влияние гель-субстрата на посевные характеристики и показатели роста проростков кресс-салата (сорт Ажур)

Вариант опыта**	Энергия прорастания		Всхожесть		Длина ростка		Длина корня	
	%	% от контроля	%	% от контроля	см	% от контроля	см	% от контроля
ТАП (контроль)	94	100	98	100	4,9±0,2	100	3,0±0,3	100
ТАП + СГ (эталон)	94	100	95	97	5,9±0,3*	120*	4,2±0,4*	140*
ТАП + ГГ разведение 1:200	91	97	94	96	5,4±0,3	110	3,9±0,4*	130*
ТАП + ГГ разведение 1:300	97	103	98	100	5,6±0,3*	114*	3,9±0,4*	130*
ТАП + ГГ разведение 1:400	81	86	89	91	5,0±0,3	102	3,7±0,3*	123*
ТАП + ГГ разведение 1:500	94	100	95	97	5,9±0,2*	120*	4,4±0,3*	147*
ТАП + ГГ разведение 1:600	87	93	98	100	4,7±0,2	96	3,6±0,3	120

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5 %-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель.

Таблица 4. Влияние гель-субстрата на накопление сырой, сухой массы и сухого вещества проростками кресс-салата (сорт Ажур) в регулируемых лабораторных условиях.

Вариант** опыта	Сырая масса 100 проростков		Сухая масса 100 проростков		Сухое вещество в проростках	
	г	% от контроля	г	% от контроля	%	% от контроля
ТАП (контроль)	2,51	100	0,127	100	5,0	100
ТАП + СГ (эталон)	3,11*	124*	0,189*	149*	6,1*	122*
ТАП + ГГ разведение 1:200	2,63	105	0,128	101	4,9	98
ТАП + ГГ разведение 1:300	2,67	106	0,122	96	4,6	92
ТАП + ГГ разведение 1:400	2,59	103	0,130	102	5,0	100
ТАП + ГГ разведение 1:500	2,74	109	0,126	99	4,6	92
ТАП + ГГ разведение 1:600	2,18	87	0,122	96	5,6	112

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5 %-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель.

Изучение влияния гель-субстрата на физиологические процессы роста, развития и формирования продуктивности растений листового салата

В серии вегетационных экспериментов в регулируемых условиях агробиополигона исследовано влияние созданных гель-субстратов на основе сополимеров 3-сульфопропилметакрилата и 2-гидроксиэтилметакрилата (СПМА-со-ГЭМА) с и без обогащения макро- и микроэлементами на листовой салат сорта Тайфун.

Установлено, что выращивание растений салата в присутствии в корнеобитаемой среде суспензий гидрогелей способствовало достоверному или в виде тенденции увеличению показателей роста растений: высоты (на 13–15%), розетки (на 4–14%), площади листьев (на 10–45%) и в итоге – сырой (на 6–32%) и сухой (на 4–47%) массы листьев по сравнению с контролем (табл. 5).

При этом максимальный положительный эффект, существенно более выраженный, чем в контроле (ТАП) и в эталонном варианте (ТАП + СГ), отмечен в варианте с применением суспензии модифицированного гидрогеля и был достигнут за счет обогащения макро- и микроэлементами (ТАП + м ГГ, разведение 1:500). В указанном варианте также наблюдалась значимая тенденция к увеличению

процента сухого вещества, что косвенно свидетельствует об усилении поступления ассимилянтов и минеральных соединений в листья. Таким образом, насыщение гидрогеля макро- и микроэлементами в оптимальных для растений концентрациях (ноу-хау) способствовало существенному усилению его воздействия на процессы роста не только за счет растяжения клеток, но и за счет поступления в растения необходимых элементов питания, кофакторов и участников метаболических процессов вследствие, очевидно, активизации процессов метаболизма и, в частности, биосинтеза фотосинтетических пигментов хлорофиллов и каротиноидов, служащих донорами энергии для фотосинтетических реакций, и др. (табл. 6). Отмечается достоверное или в виде тенденции повышение содержания в листьях хлорофилла *a* (на 21–23%) и суммы хлорофиллов (на 10–12%), что свидетельствует об увеличении емкости фотосинтетического аппарата. Достоверное или в виде тенденции снижение содержания хлорофилла *b* и каротиноидов при значимом увеличении содержания хлорофилла *a* свидетельствует об оптимизации окислительно-восстановительных процессов в растениях. Последнее подтверждается результатами анализа показателей работы антиоксидантных систем в листьях растений (табл. 7).

Таблица 5. Влияние гель-субстрата на показатели роста растений салата (сорт Тайфун) при выращивании в регулируемых условиях агробиополигона

Вариант опыта **	Растение						
	высота, см	диаметр розетки, см	число листьев, шт.	сырая масса, г	сухая масса, г	сухое в-во, %	площадь листьев см ²
Абсолютные значения							
ТАП (контроль)	14,0±1,2	23,0±1,4	13,8±1,3	46,6±7,0	2,40±0,59	5,1	1511,0±378,0
ТАП + СГ (эталон)	15,8±1,2	25,4±1,9	14,0±1,5	50,6±8,2	2,42±0,76	4,8	1597,0±518,0
ТАП + ГГ разведение 1:500	16,1±1,2	23,9±1,4	13,0±1,3	49,2±9,9	2,50±0,56	5,1	1669,0±374,0
ТАП + м ГГ разведение 1:500	15,9±0,9	26,2±1,9	15,0±1,0	61,5±1,1*	3,53±0,39*	5,7	2184,0±245,0*
% от контроля							
ТАП + СГ (эталон)	113	110	101	109	101	94	106
ТАП + ГГ разведение 1:500	115	104	94	106	104	100	111
ТАП + м ГГ разведение 1:500	114	114	109	132*	147*	112	145*

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель; ТАП + мГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель модифицированный с добавлением макро- и микроэлементов.

Таблица 6. Влияние гель-субстрата на содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений салата (сорт Тайфун) при выращивании в регулируемых условиях агробиополигона

Показатели	Листья			
	Вариант опыта **			
	ТАП (контроль)	ТАП + СГ (эталон)	ТАП + ГГ, разведение 1:500	ТАП + мГГ, разведение 1:500
Абсолютные значения				
Хлорофилл. <i>a</i> , мг 100 г ⁻¹ н.в.	70,57	80,24*	85,56*	87,02*
Хлорофилл. <i>b</i> , мг 100 г ⁻¹ н.в.	22,64	18,59*	19,11*	15,97*
Σ <i>a</i> + <i>b</i> , мг 100 г ⁻¹ н.в.	93,21	98,83	104,67	102,99
Каротиноиды, мг 100 г ⁻¹ н.в.	25,47	15,98*	22,51	18,88*
% от контроля				
Хлорофилл. <i>a</i> , мг 100 г ⁻¹ н.в.	100	114*	121*	123*
Хлорофилл. <i>b</i> , мг 100 г ⁻¹ н.в.	100	82*	84*	71*
Σ <i>a</i> + <i>b</i> , мг 100 г ⁻¹ н.в.	100	106	112	111
Каротиноиды, мг 100 г ⁻¹ н.в.	100	63*	88	74*

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5 %-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель; ТАП + мГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель модифицированный с добавлением макро- и микроэлементов.

Таблица 7. Влияние гель-субстрата на работу антиоксидантных систем в листьях салата (сорт Тайфун) при выращивании в регулируемых условиях агробиополигона

Показатели	Листья			
	Вариант опыта **			
	ТАП (контроль)	ТАП + СГ (эталон)	ТАП + ГГ, разведение 1:500	ТАП + мГГ, разведение 1:500
Абсолютные значения				
Каталаза, мкмоль H ₂ O ₂ мин ⁻¹	237,39	237,06	215,54*	250,84
ПОЛ***, ммоль г ⁻¹	0,0026	0,0024	0,0023	0,0022*
% от контроля				
Каталаза, мкмоль H ₂ O ₂ мин ⁻¹	100	100	91	106
ПОЛ***, ммоль г ⁻¹	100	92	89	85*

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5 %-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель; ТАП + мГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель модифицированный с добавлением макро- и микроэлементов; *** ПОЛ – интенсивность перекисного окисления липидов.

Так, установленное снижение интенсивности ПОЛ (на 12–15%) и отсутствие достоверных изменений активности каталазы во всех исследуемых вариантах свидетельствуют о снижении доли окислительных процессов в тканях листьев и стабилизации работы антиоксидантных систем растений по сравнению с контролем.

О повышении эффективности работы фотосинтетического аппарата в листьях салата свидетельствуют данные флуоресцентного анализа. Зафиксированы высокие значимые отличия от контроля и от эталона по параметрам флуоресценции листьев (табл. 8).

Таблица 8. Влияние геля-субстрата на параметры флуоресценции листьев растений салата сорта Тайфун при выращивании в регулируемых условиях агробиополигона.

Показатели**	ТАП (контроль)	% от контроля	ТАП + СГ (эталон)	% от контроля	ТАП + ГГ, разведение 1:500	% от контроля
Fv/Fm	0,827±0,014	100	0,808±0,028	98	0,803±0,008	97
Y (II)	0,099±0,004	100	0,152±0,066*	154*	0,181±0,041*	183*
qP	0,142±0,021	100	0,237±0,123*	167*	0,303±0,067*	213*
qL	0,047±0,018	100	0,104±0,081*	221*	0,150±0,039*	319*
qN	0,394±0,218	100	0,457±0,161*	116*	0,616±0,044*	156*
NPQ	0,483±0,405	100	0,595±0,312*	123*	0,955±0,162*	198*
Y (NO)	0,632±0,175	100	0,553±0,155*	88*	0,421±0,043*	67*
Y (NPQ)	0,270±0,170	100	0,295±0,110*	109*	0,398±0,036*	147*

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5 %-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель; Fv/Fm – максимальный фотохимический выход ФС II; Y(II) – эффективный фотохимический выход ФС II; qP – коэффициент фотохимического тушения флуоресценции, основанный на модели лужи – концепции отдельных антенных блоков ФС II; qL – коэффициент фотохимического тушения флуоресценции, основанный на модели озера – множество реакционных центров равномерно распределены по взаимосвязанным антенным блокам ФС II; qN – коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции; NPQ – коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции, рассчитываемый согласно уравнению Штерна-Фольмера; Y(NO) – нерегулируемые потери энергии возбуждения; Y(NPQ) – регулируемые потери энергии возбуждения за счет диссипации тепла с участием ΔpH- и зеаксантин-зависимых механизмов.

Вероятно, это связано с тем, что листовые растения реализуют весь свой потенциал для формирования зеленой массы, а условия корнеобитаемой среды, связанные с продуктивностью растений, как это было показано ранее, в значительной степени определяют интенсивность фотосинтетических процессов. Наибольшее значение максимального фотохимического выхода ФС II Fv/Fm для растений салата отмечено в контрольном варианте. При этом эффективный фотохимический выход ФС II Y(II) достоверно отличался на +83% от контрольного для растений, выращенных с использованием гидрогеля на основе СПМА-со-ГЭМА. Коэффициенты фотохимического тушения флуоресценции qP и qL характеризуют долю открытых реакционных центров ФС II. Различия коэффициентов заключаются в том, что qP основан на концепции отдельных антенных блоков ФС II модели лужи (Kramer et al., 2004), а qL основан на модели озера (Kramer et al., 2004), когда множество реакционных центров равномерно распределены по взаимосвязанным антенным блокам ФС II, что считается более реалистичным по отношению к листьям. Наибольшие значения указанных параметров характерны для вариантов с применением гидрогелей: qP был выше на 114% по сравнению с контролем, а qL – на 219%. Так как Y(II) оценивается для образцов, адаптированных к свету, и в связи с этим возможно возникновение некоторых

типов нефотохимических потерь энергии, а также частичное закрытие центров ФС II, то полученные данные согласуются и свидетельствуют о высокой доли открытых реакционных центров в растениях, выращиваемых на гидрогелях, после их адаптации к свету.

Коэффициенты нефотохимического тушения флуоресценции qN и NPQ (рассчитываются согласно уравнению Штерна-Фольмера) связаны с тилакоидными pH- и зеаксантин-зависимыми механизмами тушения. Наблюдается превышение их значений относительно контроля в вариантах с использованием гидрогеля: qN – на 56%, NPQ – на 98%.

Нерегулируемые потери энергии возбуждения Y(NO), включая рассеяние тепла и флуоресцентное излучение, наоборот, оказались ниже в вариантах с выращиванием растений салата при нанесении на ТАП суспензии глины (на 12% относительно контроля) и при использовании гидрогеля (на 33%). При этом регулируемые потери энергии возбуждения за счет диссипации тепла с участием ΔpH- и зеаксантин-зависимых механизмов Y(NPQ) были выше: в виде тенденции – на 9% при использовании глины и достоверно на 48% – при применении гидрогеля, что свидетельствует об эффективной регулируемости потоков фотосинтетической энергии и рассеивании избыточной энергии возбуждения на уровне антенных светособирающих комплексов.

Изучение влияния созданного гель-субстрата на качественные характеристики растительной продукции

Результаты анализа химического состава листьев салата сорта Тайфун, определяющего его качество и безопасность, показали, что присутствие в корнеобитаемой среде гель-субстратов способствовало достоверному или в виде тенденции

увеличению содержания витамина С (на 8–15%), микроэлементов магния (на 11–20%), железа (на 7–14%) и марганца (на 8–17%), а также снижению содержания нитратов (на 40–45%) по сравнению с контролем. По содержанию нитратов растительная продукция полностью соответствовала санитарно-гигиеническим нормативам Российской Федерации (табл. 9).

Таблица 9. Влияние гель-субстрата на химический состав листьев салата (сорт Тайфун) при выращивании в регулируемых условиях агробиополигона

Показатели	Листья			
	Вариант опыта**			
	ТАП (контроль)	ТАП + СГ (эталон)	ТАП + ГГ, разведение 1:500	ТАП + МГГ, разведение 1:500
Абсолютные значения				
Витамин С, мг/100 г н.в.	15,84	12,10*	17,16	18,25*
Нитраты, мг/кг н.в.	1200,4	1807,0*	664,9*	715,2*
Влажность, %	94,56	93,44	95,10	94,87
Сухое вещество, %	5,44	6,56*	4,90	5,13
Сырая зола, % а.с.в.	20,78	21,58	20,60	19,71
Азот, % а.с.в.	4,35	4,51	4,33	4,32
Фосфор, % а.с.в.	0,81	0,81	0,76	0,79
Калий, % а.с.в.	8,80	9,75	8,70	7,75
Кальций, % а.с.в.	1,52	1,49	1,46	1,50
Магний, % а.с.в.	0,43	0,45	0,48	0,52*
Железо, мг/кг а.с.в.	75,0	78,6	80,5	85,6*
Медь, мг/кг а.с.в.	5,03	4,86	4,90	4,78
Цинк, мг/кг а.с.в.	47,4	47,5	44,1	44,8
Марганец, мг/кг а.с.в.	60,2	67,3	70,4*	65,1
% от контроля				
Витамин С, мг/100 г н.в.	100	76*	108	115*
Нитраты, мг/кг н.в.	100	150*	55*	60*
Влажность, %	100	99	101	100
Сухое вещество, %	100	121*	90	94
Сырая зола, % а.с.в.	100	104	99	95
Азот, % а.с.в.	100	104	100	99
Фосфор, % а.с.в.	100	100	94	98
Калий, % а.с.в.	100	111	99	88
Кальций, % а.с.в.	100	98	96	99
Магний, % а.с.в.	100	105	112	121*
Железо, мг/кг а.с.в.	100	105	107	114*
Медь, мг/кг а.с.в.	100	97	97	95
Цинк, мг/кг а.с.в.	100	100	93	95
Марганец, мг/кг а.с.в.	100	112	117*	108

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5 %-м уровне значимости; ** ТАП – тонкослойный аналог почвы; ТАП + СГ (эталон) – тонкослойный аналог почвы + суспензия глины; ТАП + ГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель; ТАП + МГГ – тонкослойный аналог почвы + гидрогель модифицированный с добавлением макро- и микроэлементов.

Таким образом, отмеченная стимуляция процессов роста растений салата при их выращивании с использованием тестируемых гель-субстратов преимущественно обусловлена:

- увеличением площади ассимилирующей поверхности и накоплением ассимилянтов в листьях и стеблях;

- усилением поступления ряда макро- и микроэлементов в листья растений на протяжении вегетационного периода;

- улучшением физиологического состояния растений за счет увеличения емкости и повышения эффективности работы фотосинтетического аппарата, а также стабилизации работы антиоксидантных систем в листьях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированные новые гель-субстраты на основе сополимеров 3-сульфопропилметакрилата и 2-гидроксиэтилметакрилата (СПМА-со-ГЭМА) обладают выраженными сорбционными свойствами и высокой набухаемостью.

На примере фитотест-культуры (кресс-салата сорта Ажур) показана высокая биологическая активность гель-субстрата на основе СПМА-со-ГЭМА, выражающаяся в стимулирующем воздействии на морфометрические показатели роста проростков при обработке семян, и определена его оптимальная для роста растений концентрация – разведение водой в соотношении 1:500.

Анализ всех оцениваемых показателей в совокупности позволил установить, что введение суспензий гель-субстратов на основе СПМА-со-ГЭМА с добавлением растворов макро- и микроэлементов

или без них в состав корнеобитаемой среды оказало положительное влияние на растения листового салата, выразившееся в улучшении их физиологического состояния за счет увеличения емкости и повышения эффективности работы фотосинтетического аппарата, стабилизации работы антиоксидантных систем, обогащения листьев необходимыми растениям макро- и/или микроэлементами, что в конечном итоге обеспечило наблюдаемые значимые положительные изменения показателей роста и продуктивности растений, а также качества и безопасности формируемой растительной продукции, в частности увеличение содержания сахаров, витамина С, макро- и микроэлементов, а также преимущественное снижение содержания нитратов. Вся полученная растительная продукция полностью соответствует санитарно-гигиеническим нормативам Российской Федерации.

Наиболее существенное влияние на растения салата оказывало присутствие в корнеобитаемой среде гель-субстрата, обогащенного макро- и микроэлементами. Высокая эффективность его применения подчеркивает перспективность дальнейших углубленных исследований механизмов влияния подобных гель-субстратов на культурные растения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ в соответствии с соглашением от 25.03.2022 г. № 22-26-20087 и Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 12.04.2022 г. № 01/2022, грант № 22-26-20087.

Список литературы

- Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. 188 с.
- ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М., 1985. 58 с.
- Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений / Под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1987. 430 с.
- Ермаков Е.И. Избранные труды. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2009. 192 с.
- Ламан Н.А., Вавилова Т.В., Судник А.Ф. Использование полимерных материалов для оструктурирования почв и субстратов закрытого грунта (обзор) // Ботаника (исследования): сборник научных трудов. Институт эксперимент. бот. НАН Беларуси. Минск: Право и экономика, 2010. Вып. 39. С. 332–349.
- Патент на полезную модель RU № 189309 U1 «Фитотехкомплекс для выращивания растений» / Черноусов И.Н., Панова Г.Г., Удалова О.Р., Александров А.В. 2019.
- Починок Х.Н. Методы биохимического анализа растений. Киев: Изд. «Наукова Думка», 1976. 334 с.
- MINI-PAM-II Руководство по автономному использованию. Edition 3. Heinz Walz GmbH. 2018. 122 с.
- Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов. Рос. акад. мед. наук. Ин-т питания / Под ред. И.М. Скурихина, В.А. Тутельяна. М.: Брандес: Медицина, 1998. 341 с.
- Ai F., Yin X., Hu R., Ma H., Liu W. Research into the super-absorbent polymers on agricultural water // *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 245. Article number 106513. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106513
- Callaghan T.V., Abdelnour H., Lindley D.K. The environmental crisis in the Sudan: the effect of water-absorbing synthetic polymers on tree germination and early survival // *Journal of Arid Environments*. 1988. Vol. 14(3). pp. 301–317.
- Cannazza G., Cataldo A., De Benedetto E., Demitri C., Madaghiele M., Sannino A. Experimental assessment of the use of a novel superabsorbent polymer (SAP) for the optimization of water consumption in agricultural irrigation process // *Water*. 2014. Vol. 6 (7). pp. 2056–2069. DOI: 10.3390/w6072056
- Dehkordi D.K. Effect of superabsorbent polymer on soil and plants on steep surfaces // *Water Environ. J.* 2018. Vol. 32. pp. 158–163. DOI: 10.1111/wej.12309
- Dragan E.S. Design and applications of interpenetrating polymer network hydrogels. A review // *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 243. pp. 572–590. DOI: 10.1016/j.cej.2014.01.065

- Dwivedi A. Super absorbent polymers and their composites for application in agriculture // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2021. Vol. 9. Iss. IX. pp. 2321–9653. DOI: 10.22214/ijraset.2021.38048
- Elshafie H.S., Camele I. Applications of absorbent polymers for sustainable plant protection and crop yield // Sustainability. 2021. Vol. 13. pp. 32–53. <https://doi.org/10.3390/su13063253>
- Erickson R.E. US Patent No. 4,424,247. Washington: U.S. Patent and Trademark Office, 1984.
- Gala S., Mao Y., Bao X., Ma B., Pan Y., Huang J. Preparation of high water-absorbing hydrogel based on grafted micro/nano cellulose // Bioresources. 2021. Vol. 16. Iss. 1. pp. 1256–1275. DOI: 10.15376/biores.16.1.1256-1275
- Islam M.R., Xue X., Mao S., Ren C., Eneji A.E., Hu Y. Effects of water saving superabsorbent polymer on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in oat (*Avena sativa* L.) under drought stress // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2011. Vol. 91 (4). pp. 680–686. DOI: 10.1002/jsfa.4234
- Kramer D.M., Johnson G., Kiirats O., Edwards G.E. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes // Photosynthesis research. 2004. Vol. 79. pp. 209–218. DOI: 10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d
- Laishevskina S., Kuleshova T., Panova G., Ivan'kova E., Iakobson O., Dobrodumov A., Shevchenko N., Yakimansky A. Sulfonic cryogels as innovative materials for biotechnological applications: synthesis, modification, and biological activity // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24. pp. 29–49. <https://doi.org/10.3390/ijms24032949>
- Liang R., Liu M., Wu L. Controlled-release NPK compound fertilizer with the function of water retention // Reactive & Functional Polymers. 2007. Vol. 67 (9). pp. 769–779. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2006.12.007
- Milani P., França D., Balieiro A.G., Faez R. Polymers and its applications in agriculture // Polímeros. 2017. Vol. 27(3). pp. 256–266. DOI: 10.1590/0104-1428.09316
- Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. Fundamentals of physical modeling of “ideal” agroecosystems // Technical Physics. 2020. Vol. 65(10). pp. 1563–1569. DOI: 10.1134/s1063784220100163
- Purvid A.C., Shewfeld R.L., Gegogine J.W. Superoxide production in mitochondria isolated from green bell pepper fruit // Physiologia Plantarum. 1995. Vol. 94. pp. 743–749. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1995.tb00993.x
- Sharma S., Dua A., Malik A. Polyaspartic acid based superabsorbent polymers // European Polymer Journal. 2014. Vol. 59. pp. 363–376. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.07.043
- Xu S., Li X., Wang Y., Hu Z., Wang R. Characterization of slow-release collagen-g-poly (acrylic acid-co-2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid)-iron(III) superabsorbent polymer containing fertilizer // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. Iss. 11. Article number 47178. DOI: 10.1002/app.47178
- Woodhouse J., Johnson M.S. Effect of superabsorbent polymers on survival and growth of crop seedlings // Agricultural Water Management. 1991. Vol. 20 (1). pp. 63–70.

References

- Vershinin P.V. *Pochvennaya struktura i usloviya yeye formirovaniya* [Soil structure and conditions of its formation]. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1958.
- GOST 12038-84 *Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vshozhesti* [State Standard 12038-84 Seeds of agricultural crops. Germination methods]. M., 1985, 58 p.
- Yermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P. i dr. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants] / Pod red. A.I. Yermakova. 3-ye izd., pererab. i dop. L.: Agropromizdat. Leningraskoye otdeleniye, 1987, 430 p.
- Yermakov Ye.I. *Izbrannyye trudy* [Selected works]. SPb.: PIYaF RAN, 2009, 192 p.
- Laman N.A., Vavilova T.V., Sudnik A.F. *Ispol'zovaniye polimernykh materialov dlya ostrukturivaniya pochv i substratov zakrytogo grunta (obzor)* [The use of polymeric materials for structuring soils and greenhouse substrates (review)]. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov*. Institut eksperiment. bot. NAN Belarusi. Minsk: Pravo i ekonomika, 2010, iss. 39, pp. 332–349.
- Patent na poleznuyu model' RU № 189309 U1 «Fitotekhnokompleks dlya vyrashchivaniya rasteniy» [Utility model patent RU No. 189309 U1 «Phytotechnical complex for growing plants»]. Chernousov I.N., Panova G.G., Udalova O.R., Aleksandrov A.V., 2019.
- Pochinok H.N. *Metody biokhimicheskogo analiza rasteniy* [Methods of biochemical analysis of plants]. Kiev: Naukova Dumka, 1976, 334 p.
- MINI-PAM-II *Rukovodstvo po avtonomnomu ispol'zovaniyu* [MINI-PAM-II Guide for autonomous use]. Edition 3. Heinz Walz GmbH, 2018, 122 p.
- Rukovodstvo po metodam analiza kachestva i bezopasnosti pishchevykh produktov* [Guidance on methods of analyzing the quality and safety of foodstuffs]. Ros. akad. med. nauk. In-t pitaniya / Pod red. I.M. Skurikhina, V.A. Tutel'yan. M.: Brandes: Meditsina, 1998, 341 p.
- Ai F., Yin X., Hu R., Ma H., Liu W. Research into the super-absorbent polymers on agricultural water // Agricultural Water Management. 2021. Vol. 245. Article number 106513. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106513
- Callaghan T.V., Abdelnour H., Lindley D.K. The environmental crisis in the Sudan: the effect of water-absorbing synthetic polymers on tree germination and early survival // Journal of Arid Environments. 1988. Vol. 14(3). pp. 301–317.

- Cannazza G., Cataldo A., De Benedetto E., Demitri C., Madaghiele M., Sannino A. Experimental assessment of the use of a novel superabsorbent polymer (SAP) for the optimization of water consumption in agricultural irrigation process // *Water*. 2014. Vol. 6 (7). pp. 2056–2069. DOI: 10.3390/w6072056
- Dehkordi D.K. Effect of superabsorbent polymer on soil and plants on steep surfaces // *Water Environ. J.* 2018. Vol. 32. pp. 158–163. DOI: 10.1111/wej.12309
- Dragan E.S. Design and applications of interpenetrating polymer network hydrogels. A review // *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 243. pp. 572–590. DOI: 10.1016/j.cej.2014.01.065
- Dwivedi A. Super absorbent polymers and their composites for application in agriculture // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2021. Vol. 9. Iss. IX. pp. 2321–9653. DOI: 10.22214/ijraset.2021.38048
- Elshafie H.S., Camele I. Applications of absorbent polymers for sustainable plant protection and crop yield // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. pp. 32–53. <https://doi.org/10.3390/su13063253>
- Erickson R.E. US Patent No. 4.424.247. Washington: U.S. Patent and Trademark Office, 1984.
- Gala S., Mao Y., Bao X., Ma B., Pan Y., Huang J. Preparation of high water-absorbing hydrogel based on grafted micro/nano cellulose // *Bioresources*. 2021. Vol. 16. Iss. 1. pp. 1256–1275. DOI: 10.15376/biores.16.1.1256-1275
- Islam M.R., Xue X., Mao S., Ren C., Eneji A.E., Hu Y. Effects of water saving superabsorbent polymer on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in oat (*Avena sativa* L.) under drought stress // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2011. Vol. 91 (4). pp. 680–686. DOI: 10.1002/jsfa.4234
- Kramer D.M., Johnson G., Kiirats O., Edwards G.E. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes // *Photosynthesis research*. 2004. Vol. 79. pp. 209–218. DOI: 10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d
- Laishevskina S., Kuleshova T., Panova G., Ivan'kova E., Iakobson O., Dobrodumov A., Shevchenko N., Yakimansky A. Sulfonic cryogels as innovative materials for biotechnological applications: synthesis, modification, and biological activity // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. Vol. 24. pp. 29–49. <https://doi.org/10.3390/ijms24032949>
- Liang R., Liu M., Wu L. Controlled-release NPK compound fertilizer with the function of water retention // *Reactive & Functional Polymers*. 2007. Vol. 67 (9). pp. 769–779. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2006.12.007
- Milani P., França D., Balieiro A.G., Faez R. Polymers and its applications in agriculture // *Polímeros*. 2017. Vol. 27(3). pp. 256–266. DOI: 10.1590/0104-1428.09316
- Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. Fundamentals of physical modeling of “ideal” agroecosystems // *Technical Physics*. 2020. Vol. 65(10). pp. 1563–1569. DOI: 10.1134/s1063784220100163
- Purvid A.C., Shewfeld R.L., Gegogine J.W. Superoxide production in mitochondria isolated from green bell pepper fruit // *Physiologia Plantarum*. 1995. Vol. 94. pp. 743–749. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1995.tb00993.x
- Sharma S., Dua A., Malik A. Polyaspartic acid based superabsorbent polymers // *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 59. pp. 363–376. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.07.043
- Xu S., Li X., Wang Y., Hu Z., Wang R. Characterization of slow-release collagen-g-poly (acrylic acid-co-2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid)-iron(III) superabsorbent polymer containing fertilizer // *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. Vol. 136. Iss. 11. Article number 47178. DOI: 10.1002/app.47178
- Woodhouse J., Johnson M.S. Effect of superabsorbent polymers on survival and growth of crop seedlings // *Agricultural Water Management*. 1991. Vol. 20 (1). pp. 63–70.