

579.64:631.81
EDN FZRMYX

Дидович С. В.^{1,2}, Крыжко А. В.^{1,2}, Смаглий Н. В.^{1,2}
**ОЦЕНКА БИТОКСИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»;

²ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»

Реферат. В последние годы в мировой сельскохозяйственной практике в зонах неустойчивого и недостаточного влагообеспечения активно развиваются гидрогелевое земледелие и растениеводство. Использование инновационных разработок суперабсорбентов сельскохозяйственного назначения предусматривает всестороннее изучение их экологической безопасности и эффективности применения. Цель исследований – оценить биотоксичность инновационных полимерных гидрогелевых суперабсорбентов на сельскохозяйственных растениях и микроорганизмах для использования в технологии выращивания сельскохозяйственных культур. В экспериментах использованы инновационные гидрогелевые суперабсорбенты на основе акрикловой кислоты, акрилата калия и акриламида. Проведена биодиагностика токсичности гидрогелей на горохе (*Pisum sativum* L.), пшенице (*Triticum aestivum* L.), осуществлена оценка посевных качеств семян (дружности, энергии и скорости прорастания, всхожести, биомассы проростков), исследовано их влияние на рост *Azotobacter vinelandii* и *Rhizobium leguminosarum* в сравнении с производственными гидрогелями с применением биотестирования и микробиологических методов. Установлено, что полимерные гидрофильные гидрогели на основе полиакрилатов натрия и калия, акрикловой кислоты и акриламида не содержат азотфиксирующих, фосфатмобилизующих, аммонифицирующих, нитрифицирующих, целлюлозолитических, олиготрофных микроорганизмов и микроскопических грибов. Экспериментальные синтетические полимерные гидрогели характеризовались низким индексом фитотоксичности (ИТФ) при биотесте на посевные качества семян гороха (ИТФ 0,74–0,79), не оказывали существенного влияния на посевные качества семян пшеницы (ИТФ 0,93–0,94) и были на уровне производственных суперабсорбентов на основе полиакрилатов калия и натрия (ИТФ 0,74–0,76 и 0,94–0,97). Выявлено, что экспериментальные образцы синтетических полимерных гидрогелей обладают низким индексом токсичности (ИТ) для *Azotobacter vinelandii* (ИТ 0,74–0,76) в сравнении с высокой токсичностью синтетических гидрогелей на основе акрилатов натрия и калия (ИТ 0,31–0,42), однако высокой токсичностью по отношению к *Rhizobium leguminosarum* (ИТ 0,14–0,30) в сравнении с производственными суперабсорбентами (ИТ 0,54–0,71).

Ключевые слова: гидрогели, индекс токсичности, биотест, посевные качества семян, горох, пшеница, *Azotobacter*, *Rhizobium leguminosarum*.

Для цитирования: Дидович С. В., Крыжко А. В., Смаглий Н. В. Оценка биотоксичности полимерных гидрогелей сельскохозяйственного назначения // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 3(31). С. 30–42. EDN: FZRMYX.

For citation: Didovich S. V., Kryzhko A. V., Smaglyi N. V. Analysis of biototoxicity of polymer hydrogels for agricultural purposes // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 3(31). P. 30–42. EDN: FZRMYX.

Введение

В последние десятилетия полимерные гидрофильные гидрогели активно внедряются в медицине, фармакологии, пищевой и химической промышленности,

сельском хозяйстве и других сферах человеческой деятельности. Их мировое производство стремительно расширяется и пополняется новыми синтезированными формами от производителей США, Китая, Германии, Канады, Индии, Японии, России и других стран. По оценкам экспертов в ближайшие пять лет можно ожидать увеличение глобального рынка гидрогелей в среднем на 4,7 % (4,6 млрд долларов США) [1].

Около 10 % от всего количества выпускаемых полимерных гидрогелей используется в мировой сельскохозяйственной практике [2] для улучшения физико-химических свойств почвы и её защиты от ветровой эрозии [3–6], повышения урожайности сельскохозяйственных культур [7–9], увеличения биодоступности минеральных [5, 10] и биологических удобрений [11].

Такой растущий интерес к применению полимерных гидрогелей в сельском хозяйстве обусловлен их уникальными свойствами – высокой абсорбцией и способностью аккумулировать огромное количество жидкости (воды, раствора) [12, 13]. Гидрофильные полимеры могут быть синтетические, натуральные, композитные с определенной степенью набухания (количеством поглощенной воды по отношению к единице массы полимера), проницаемости, диффузии, сырьевого ресурса, механической прочности, эластичности, длительности действия, биodeградации, биосовместимости, экологической безопасности [3].

Внесение в почву полимерных суперабсорбентов позволяет улучшить почвенный гидрологический потенциал, сохранить продуктивную влагу в корнеобитаемой зоне и снизить водный стресс сельскохозяйственных культур [7, 14]. Это актуально для аридных почвенно-климатических условий, где активно происходит испарение влаги из верхних слоев, иссушение почвы суховеями в период вегетации сельскохозяйственных растений и приводит к снижению продуктивности севооборотов [15, 16].

В литературе есть сведения о том, что некоторые влагоудерживающие полимерные гидрогели при использовании нетоксичны, биоразлагаемы и не нарушают микробоценоз почвы, а обеспечивают дополнительное питание для почвенных микроорганизмов [17]. Учеными из университета Махатмы Ганди (штат Керала, Индия) разработан полимерный нанокомпозитный гель для капсулирования ризобактерий/бактериальных консорциумов, стимулирующих рост и развитие растений (PGPR) [18]. В таком гидрогелем препарате жизнеспособность микроорганизмов PGPR сохранялась до 60 дней, а бактериализация им существенно улучшала структуру урожая и увеличивала зерновую продуктивность *Vigna unguiculata* L., что, по мнению авторов, позволит снизить нагрузку применения экологически небезопасных минеральных удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур. В этом направлении есть определенная перспектива.

Исследования ученых Института полимеров ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (г. Казань) по применению полиакриламида и его производных – основы суперабсорбентов отмечают токсичность и мутагенность данных соединений в определенных концентрациях на микроорганизмы и необходимость проверки в каждом конкретном случае [19]. Исходя из вышеизложенного, разработанные отечественные инновационные полимерные гидрофильные гидрогели сельскохозяйственного назначения нуждаются в научно обоснованных рекомендациях и оценках эффективности применения.

Цель исследований – оценить биотоксичность инновационных полимерных гидрогельных суперабсорбентов отечественного производства на сельскохозяйственных растениях *Pisum sativum* L., *Triticum aestivum* L. и

агрономически полезных микроорганизмах *Azotobacter vinelandii* и *Rhizobium leguminosarum* для использования в технологии выращивания сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы исследований

В исследовании использована оригинальная разработка ученых ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» и ФГБОУ «Воронежский университет» – два синтетических образца гидрогеля – редкосшитые сополимеры акрикловой кислоты, акрилата калия (в разных модификациях) и акриламида: экспериментальный образец ГГ1 – белые кристаллы размером от 1 до 0,5 мм; экспериментальный образец ГГ2 – кристаллы с желтым оттенком размером от 1 до 0,5 мм. В качестве контроля в исследование включены два синтетических гидрогеля: ГГ3 – полиакрилат натрия порошкообразный (SAP, Германия) и ГГ4 – полиакриловый гидрогель на основе соли калия гранулированный (SAP, РФ). Все используемые в работе гидрогели являются суперабсорбентами, степень набухания (SR) гидрогелей – 500, рН после набухания 7,5 (слабощелочная среда).

Известно, что на поверхности гидрогелей могут функционировать различные микроорганизмы, в том числе и представители почвенных сообществ [20]. Исследовали полиакриламидные гидрогели на наличие микроорганизмов, которые могут при использовании суперабсорбентов попасть в почву, влиять на ее биологическую активность и продуктивность растений, а также конкурировать со штаммами полезных микроорганизмов при разработке биогельных микробных препаратов. Определяли количество микроорганизмов восьми основных экологотрофических групп на гидрогелях: аминотрофов, аммонификаторов, олиготрофов, азотфиксаторов, фосфатмобилизаторов, целлюлозолитиков, микромицетов, актиномицетов по общепринятым микробиологическим методикам путем глубинного введения суперабсорбента в количестве 0,05 г в чашки Петри с селективными агаризованными питательными средами (по 25 мл) в трех повторениях, культивируя при температуре 28 °С и наблюдая появление предполагаемых колоний микроорганизмов [21, 22].

Фитотоксичность гидрогелей оценивали методом биотестирования на тест-растениях: горохе (*Pisum sativum* L.) и пшенице (*Triticum aestivum* L.) с использованием почвы полевого стационара Севастопольского государственного университета (с. Кача, г. Севастополь). Отбор почвенных проб осуществляли согласно ГОСТ Р 58595-2019. Агрохимические показатели почвы определяли общепринятыми методами: содержание гумуса по Тюрину, подвижного фосфора (P₂O₅) и обменного калия (K₂O) по ГОСТ 26205-91, легкогидролизующего азота по ГОСТ 26213-91, показатель рН по ДСТУ 10390-2001, сумму карбонатов по ДСТУ 10693-2001. Почва – чернозем южный с содержанием 1,71 % гумуса; подвижного фосфора (P₂O₅) – 1,65 мг/100 г, обменного калия (K₂O) – 36,57 мг/100 г; легкогидролизующего азота 0,28 мг/100 г; рН почвенной вытяжки – 7,94, суммы карбонатов – 25,0 %. В чашки Петри засыпали по 50 г почвы с 0,05 г гидрогелей и покрывали 50 г стерильного песка, на поверхности которого раскладывали семена пшеницы сорта Багира и гороха сорта Девиз (урожай 2021 г.). Влажность субстрата довели до 20%. Посевные качества семян определяли согласно ГОСТ 12038-84. Повторность опыта четырехкратная. Контролем были варианты без внесения полимерных гидрогелей и с производственными гидрогелями ГГ3 и ГГ4. Индекс фитотоксичности (ИТФ) определяли по итогам тестирования каждой тест-культуры по формуле [23, 28]:

$$\text{ИТФ} = \text{TФ}_0 / \text{TФ}_к,$$

где TФ₀ – среднее значение показателя в опыте; TФ_к – среднее значение этого же регистрируемого показателя в контроле.

Среднее значение индекса токсичности для каждого гидрогеля рассчитывали по формуле: $ИТФ\text{ }CP = (ИТФ_1 + ИТФ_2 \dots) / n$, где ИТФ₁, ИТФ₂, и т.д. – индексы токсичности, рассчитанные для каждого показателя посевных качеств семян, n – количество показателей. Для оценки фитотоксичности использовали шкалу токсичности почв в модификации Багдасаряна А.С. (таблица 1) [24].

Таблица 1 – Шкала токсичности почв в модификации Багдасаряна А.С.

Класс токсичности	Величина ИТФ	Пояснения
VI (стимуляция)		
– значительная	>1,60	Фактор оказывает стимулирующее действие на тест-объект
– выраженная	1,50–1,60	Величина тест-функции в опыте превышает контрольное значение
– заметная	1,50	
– средняя	1,11–1,40	
– слабая	1,10	
V (норма)	0,91–1,10	Фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объектов. Величина тест-функций находится на уровне контроля
IV (низкая)	0,71–0,90	Разная степень снижения величины тест-функций в опыте по сравнению с контролем
III (средняя)	0,50–0,70	
II (высокая)	<0,50 (ниже индекса LD ₅₀ , принятого в токсикологии)	
I (сверхвысокая, вызывающая гибель тест-объекта)	Среда не пригодна для жизни тест-объекта	Наблюдается гибель тест-объектов

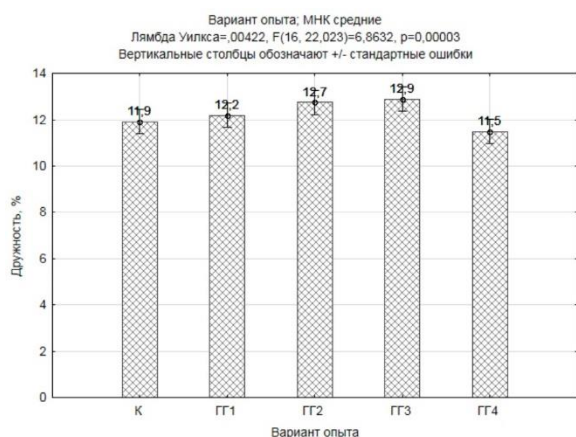
Свободноживущие микроорганизмы рода *Azotobacter* используют в качестве тест-микроорганизмов для оценки токсичности почв [25]. Клубеньковые бактерии используются для предпосевной бактеризации семян бобовых культур. Высокоэффективные селекционные штаммы представителей данных микроорганизмов являются основой биоудобрительных микробных препаратов. Кроме того, коллекционные штаммы могут быть использованы для разработки удобрительных препаратов на гидрогелевых носителях. Биотест на токсичность полимерных гидрогелей проводили путем посева на среду Эшби штамма *Azotobacter vinelandii* и на гороховую агаризованную среду штамма *Rhizobium leguminosarum* из Крымской коллекции микроорганизмов [26]. Бактериальную водную суспензию трехсуточных культур штаммов с исходным титром $2,0\text{--}2,4 \times 10^9$ колониеобразующих единиц (КОЕ)/мл вносили по 0,1 мл из четвертого–восьмого последовательных разведений в чашки Петри с 25 мл агаризованной среды и 0,05 г гидрогеля (ГГ1 и ГГ2) в вариантах опыта, в контрольных вариантах с производственными суперабсорбентами (ГГ3 и ГГ4) и без гидрогеля в трех повторениях. Культивировали при температуре 28 °С в течение трех суток. Обилие роста бактерий учитывали по количеству КОЕ [27] и рассчитывали индекс токсичности по формуле, предложенной Кабириным Р. Р. с соавторами [28] в модификации Багдасаряна А.С. [24]. Результаты исследования анализировали с помощью программы Statistica_10.

Результаты и их обсуждение

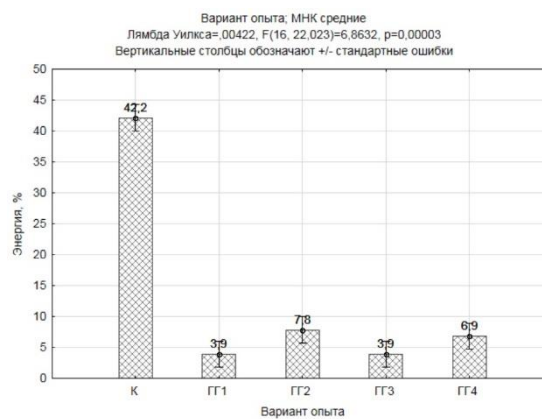
При определении функциональных особенностей микробиоты гидрогелей установлено отсутствие микроорганизмов, отвечающих за трансформацию минеральных и органических азотных соединений, что не может повлиять на интенсивность минерализационных процессов в почве. Не выявлены

азотфиксирующие и фосфатмобилизующие микроорганизмы, участвующие в круговороте азота и фосфора в агроэкосистемах, обеспечивающие растения доступными формами соответствующих элементов питания. Не обнаружено целлюлозолитических микроорганизмов, участвующих в синтезе и минерализации гумуса, разложении органических остатков. Отсутствуют микроскопические грибы, представители которых способны стимулировать рост и развитие растений, а некоторые виды являются одной из основных причин развития микробной фитотоксичности и почвоутомления в агроэкосистемах. Не выявлены олиготрофные микроорганизмы, использующие низкие концентрации мономеров, образуемых другими микроорганизмами и участвующие в образовании продуктов распада органики с низким соотношением C/N. Таким образом, исследуемые гидрогели не содержали микроорганизмов основных эколого-трофических групп, являющихся чувствительным индикатором в агроэкосистемах и определяющих эффективность растительно-микробного взаимодействия, биологическую активность и плодородие почв.

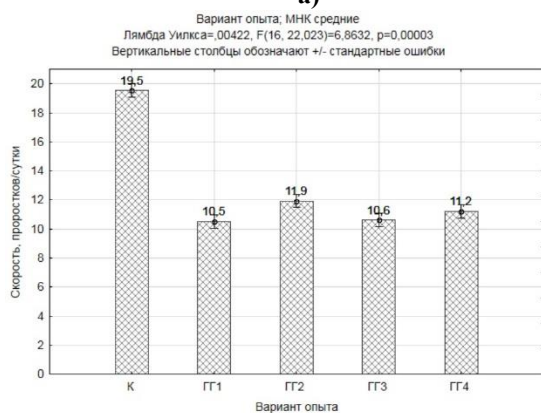
Установлено, что использование гидрогелей при проращивании гороха не влияло на дружность прорастания семян (рисунок 1 а), однако снижало в 5,4–10,8 раз их энергию (рисунок 1 б), скорость прорастания в 1,6–1,9 раза в сравнении с контролем (рисунок 1 в). При этом гидрогели не снижали всхожесть (рисунок 1 г) и биомассу проростков (рисунок 1 д) в сравнении с контролем – данные показатели были в пределах ошибки опыта ($p < 0,05$).



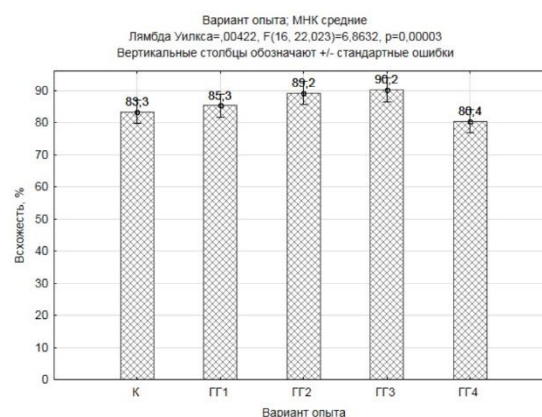
а)



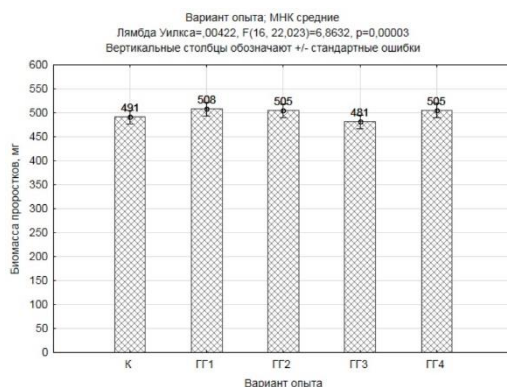
б)



в)



г)

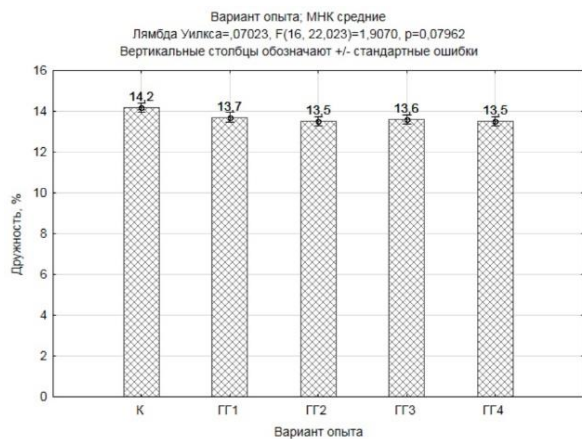


д)

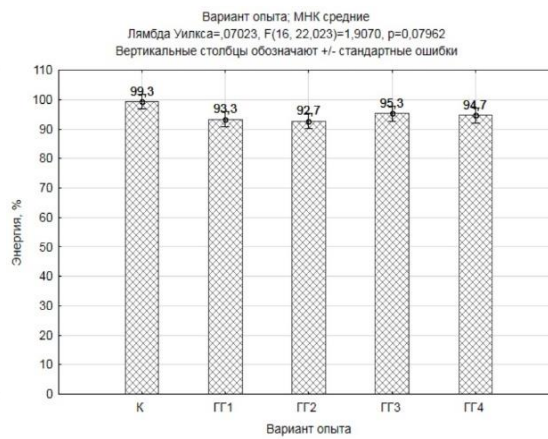
Рисунок 1 – Влияние гидрогелей на посевные качества семян гороха
а) дружность, б) энергию, в) скорость прорастания, г) всхожесть, д)
биомассу проростков (лабораторный опыт)

Примечания здесь и далее: ГГ1, ГГ2 – экспериментальные образцы синтетического суперабсорбента с акриловой кислотой, акрилатом калия (в разных модификациях) и акриламидом, ГГ3 – полиакрилат натрия порошкообразный (SAP, Германия), ГГ4 – полиакриловый суперабсорбент на основе соли калия гранулированный (SAP, РФ).

Оценивая влияние гидрогелей на посевные качества семян пшеницы, выявили достоверное снижение дружности семян на 0,5–0,7 % (рисунок 2 а), энергии прорастания на 3,0–6,6 % (рисунок 2 б), скорости прорастания на 2,0–2,9 проростков/сутки (рисунок 2 в), всхожести семян на 3,3–4,6 % (рисунок 2 г) по сравнению с контролем без внесения гидрогеля. На биомассу проростков существенно повлияло внесение гидрогелей ГГ1, ГГ2, ГГ3 и снизило данный показатель на 13–18 мг в сравнении с контролем без гидрогеля (рисунок 2 д) ($p < 0,05$).



а)



б)

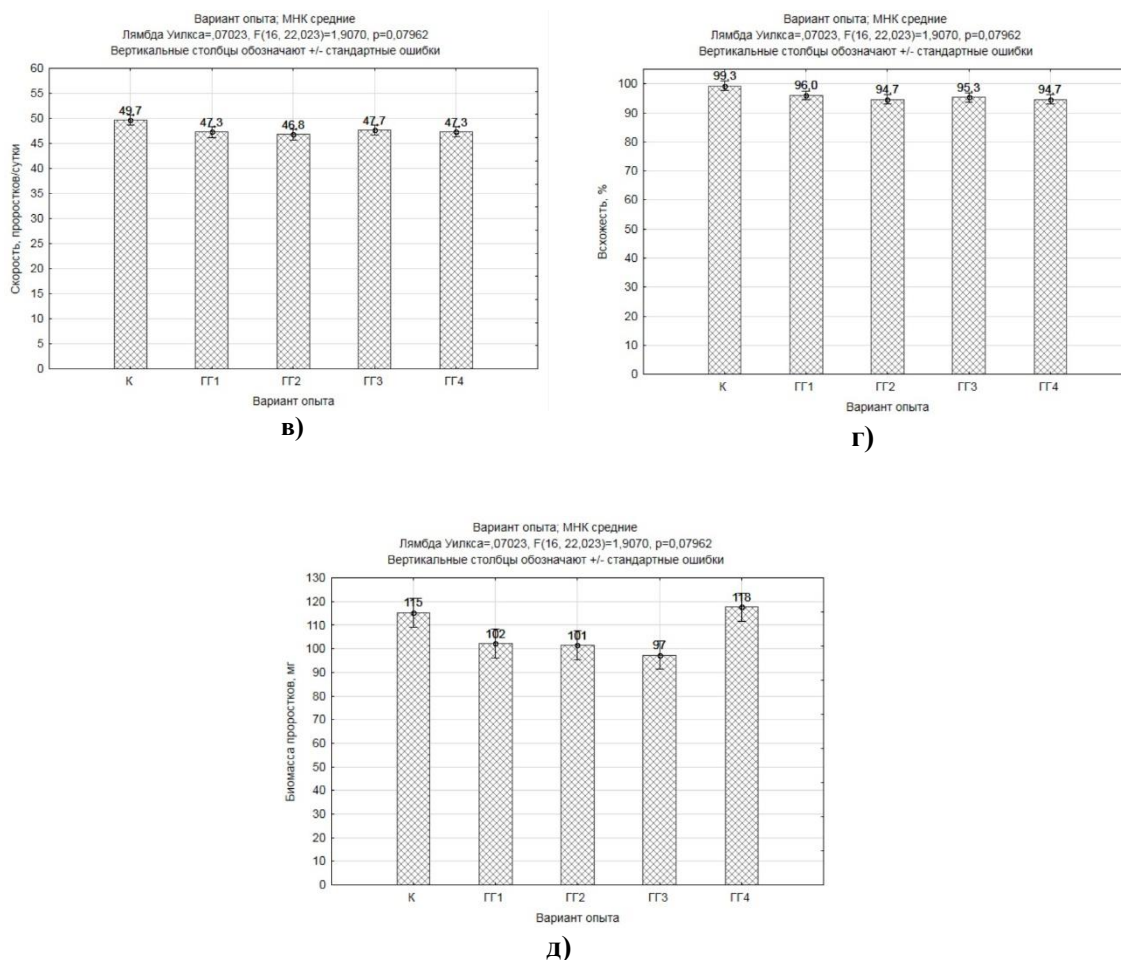


Рисунок 2 – Влияние гидрогелей на посевные качества семян пшеницы: а) дружность, б) энергию, в) скорость прорастания, г) всхожесть, д) биомассу проростков (лабораторный опыт)

Установлено, что изучаемые гидрогели характеризовались в среднем низким классом токсичности при биотесте на горохе (ИТФ 0,74–0,79), не оказывали существенного фитотоксичного влияния на посевные качества пшеницы (ИТФ 0,93–0,97) (таблица 2). Кроме того, фитотоксичность экспериментальных гидрогельных образцов (ГГ1, ГГ2) была на уровне производимых суперабсорбентов (ГГ3, ГГ4), что в целом позволяет сделать заключение о возможности их применения для влагообеспечения при выращивании растений.

Таблица 2 – Среднее значение индекса токсичности по посевным качествам семян биотеста на горохе и пшенице (лабораторный опыт)

Вариант опыта	Величина ИФТ (биотест на горохе)	Величина ИФТ (биотест на пшенице)
Контроль	–	–
ГГ1	0,74	0,94
ГГ2	0,79	0,93
ГГ3	0,76	0,94
ГГ4	0,74	0,97

Оценивали токсичность полимерных гидрогелей на тест-объекте – штамме *Azotobacter vinelandii*. Установлено, что все гидрогели угнетали рост азотобактера, снижая количество КОЕ в 1,3–3,2 раза (рисунок 3). Высокую токсичность по данному

показателю проявили производственные полиакриловые гидрогели на основе полиакрилата натрия (ГГ3, ИТ 0,31) и полиакрилата калия (ГГ4, ИТ 0,42), которая была в три раза выше, чем в контроле без гидрогеля. Низким индексом токсичности обладали экспериментальные образцы синтетических абсорбентов на основе акриловой кислоты, акрилата калия (в разных модификациях) и акриламида (ГГ1, ИТ 0,74; ГГ2, ИТ 0,76).

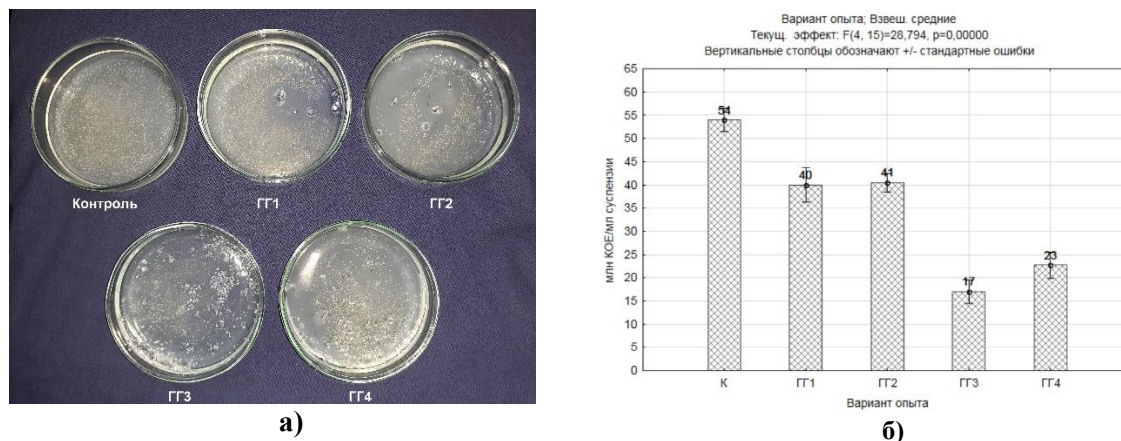


Рисунок 3 – Влияние полимерных гидрогелей на рост колоний штамма *Azotobacter vinelandii*: а) зоны угнетения – области без колоний (5-е разведение), б) влияние гидрогелей на количество колониеобразующих единиц

Установлено, что экспериментальные гидрогели (ГГ1, ГГ2) достоверно угнетали рост колоний производственного штамма *Rhizobium leguminosarum* в 3,4–7,4 раза, производственные гидрогели (ГГ3, ГГ4) снижали рост в 1,4–1,9 раза в сравнении с контролем без использования суперабсорбентов ($p < 0,05$) (рисунок 4).

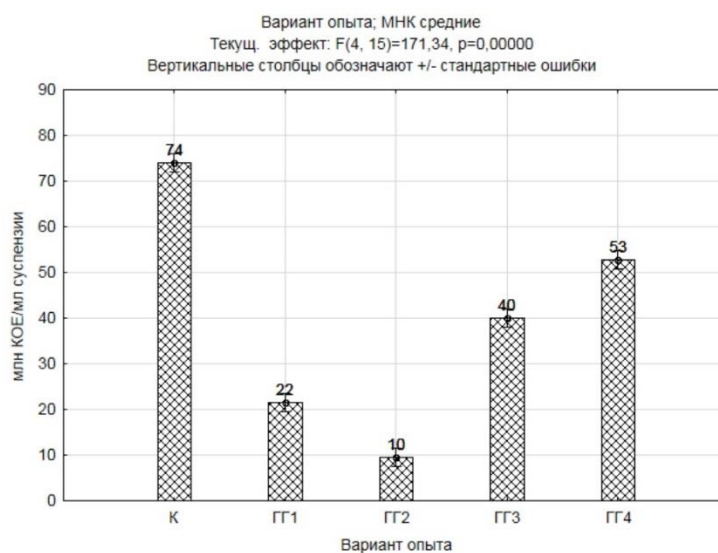


Рисунок 4 – Влияние полимерных гидрогелей на рост колоний штамма *Rhizobium leguminosarum*

Биотестирование гидрогельных суперабсорбентов на штамме *Rhizobium leguminosarum* показало высокую токсичность экспериментальных гидрогелей (ГГ1,

ИТ 0,30; ГГ2, ИТ 0,14) по сравнению со средней токсичностью контроля: гидрогеля на основе полиакрилата натрия (ГГ3, ИТ 0,54) и низкой калиевого полиакрилатного гидрогеля (ГГ4, ИТ 0,71).

Таким образом, показано, что применение экспериментальных образцов суперабсорбентов негативно влияет на рост клубеньковых бактерий гороха при посеве на питательную элективную среду и является токсичным для данного производственного активного симбиотического азотфиксатора.

Выводы

Установлено, что синтетические гидрофильные гидрогели на основе полиакрилатов калия и натрия не содержат азотфиксирующих, фосфатмобилизующих, аммонифицирующих, нитрифицирующих, целлюлозолитических, олиготрофных бактерий, микроскопических грибов основных функциональных эколого-трофических групп микроорганизмов. Показано, что экспериментальные синтетические полимерные гидрогели на основе акрикловой кислоты, акрилата калия и акриламида обладают низким классом токсичности при биотесте посевных качеств семян гороха (ИТФ – 0,74–0,79), не токсичны при биотесте посевных качеств семян пшеницы (ИТФ – 0,93–0,94) и обладали низким индексом токсичности для *Azotobacter vinelandii* (ИТ – 0,74–0,76). Выявлено, что экспериментальные гидрогели характеризовались высокой токсичностью по отношению к штамму симбиотического азотфиксатора *Rhizobium leguminosarum* (ИТ – 0,14–0,30) в сравнении с производственными суперабсорбентами (ИТ – 0,54–0,71).

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы «Приоритет-2030» Севастопольского Государственного Университета (стратегический проект №3, №121121700318-1).

Литература

1. Li S., Chen G. Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: preparation, performance, and socioeconomic impacts // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 251. Art. No. 119669. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119669.
2. Global Hydrogels Market Report 2022: Market to Reach \$16.7 Billion by 2027 - Innovations Expand Addressable Market for Hydrogels. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.18734008-62976392-f172fee874722d776562/https/www.yahoo.com/now/global-hydrogels-market-report-2022-122300669.html (дата обращения 30.05.2022).
3. Behera S., Mahanwar P. Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2019. No. 59 (6). P. 1–16. DOI: 10.1080/25740881.2019.1647239.
4. Рабаданов Р. Г. Абсорбционные свойства сильнонабухающих полимерных гидрогелей, используемых в сельском хозяйстве // Аграрная Россия. 2017. № 6. С. 2–7. DOI: 10.30906/1999-5636-2017-6-15-18.
5. Rizwan M., Gilani S. R., Durani A. I., Naseem S. Materials diversity of hydrogel: synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field // Journal of Advanced Research. 2021. No. 33. P. 15–40. DOI: 10.1016/j.jare.2021.03.007.
6. Наумов П. В., Щербакова Л. Ф., Околелова А. А. Оптимизация влагообеспеченности почв с помощью полимерных гидрогелей // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2011. № 4 (24). С. 77–81.
7. Ревенко В. Ю., Агафонов О. М. Использование гидрогелей в растениеводстве // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 11–2. С. 59–65. DOI: 10.24411/2500-1000-2018-10193.
8. Бейбулатов М. Р., Ярошук И. Э. Эффект от применения абсорбента при посадке винограда // Виноградарство и виноделие. 2012. Т. XLII. С. 31–33.
9. Старовойтов В. И., Старовойтова О. А., Манохина А. А. Возделывание картофеля с использованием влагосберегающих полимеров // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский Государственный Агроинженерный Университет имени В.П. Горячкина». 2015. № 1. С. 15–18.

10. Guilherme M. R., Aouada F. A., Fajardo A. R., Martins A. F., Paulino A. T., Davi M. F.T., 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. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017.
11. Mehrotra T., Zaman M. N., Prasad B. B., Shukla A., Aggarwal S., Singh R. Rapid immobilization of viable *Bacillus pseudomycolides* in polyvinyl alcohol/glutaraldehyde hydrogel for biological treatment of municipal wastewater // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. Iss. 9. P. 9167–9180. DOI: 10.1007/s11356-019-07296-z.
12. Ahmed E. M. Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review // *Journal of Advanced Research*. 2015. Vol. 6(2). P. 105–121. DOI: 10.1016/j.jare.2013.07.006.
13. Mignon A., De Belie N., Dubruel P., Van Vlierbergh S. Superabsorbent polymers: a review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and 'smart' derivatives // *European Polymer Journal*. 2019. Vol. 117. P. 165–178. DOI: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2019.04.054.
14. Кузнецов А. Ю. Влияние полимерной мелиорации на свойства чернозема выщелоченного, тепличного почвогрунта и урожайность сельскохозяйственных культур. Автореф. дисс. канд. с.-х. наук. Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2003. 25 с.
15. Ревенко В. Ю., Зайцев Р. Н. Изменение влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в восточной зоне Краснодарского края // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016. № 5 (88). Ч. 6. С. 9–12.
16. Данилова Т. Н. Влияние гидрогелей на показатели структуры урожая зерновых культур в условиях модельной почвенной засухи «Засушник» и в полевых условиях // *Известия СПбГАУ*. 2021. № 3. (64). С. 31–39. DOI: 10.24412/2078-1318-2021-3-31-39.
17. Максимова Ю. Г., Максимов А. Ю., Демаков В. А., Будников В. И. Влияние гидрогелей полиакриламида на микрофлору почвы // *Вестник Пермского университета. Серия «Биология»*. 2010. № 1 (1). С. 45–49.
18. Snigdha S., Kalarikkal N., Thomas S., Radhakrishnan E. K. Laponite clay/poly (ethylene oxide) gel beads for delivery of plant growth-promoting rhizobacteria // *Bulletin of Materials Science*. 2021. Vol. 44. Iss. 2. DOI: 10.1007/s12034-021-02383-9.
19. Кулагина Е. М., Юсупова Р. И., Потапова М. А. Исследование модифицированного полиакриламида на токсичность и мутагенную активность // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 14. С. 42–44.
20. Максимова Ю. Г., Горшкова А. А., Демаков В. А. Биодegradация полиакриламидов почвенной микрофлорой и штаммами амидозосодержащих бактерий // *Вестник Пермского университета. Биология*. 2017. Вып. 2. С. 200–204.
21. Теппер Е. З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2005. 254 с.
22. Експериментальна ґрунтова мікробіологія: монографія // *Наук. ред. Волкогон В. В. Київ: Аграрна наука*, 2010. 464 с.
23. Прусаченко А. В., Проценко Е. П., Миронов С. Ю., Клеева Н. А., Гриненко И. А., Галас А. В. Фитотестирование в оценке токсичности городских почв // *Экология урбанизированных территорий*. 2010. № 2. С. 105–109.
24. Багдасарян А. С. Биотестирование почв техногенных зон городских территорий с использованием растительных организмов: Автореф. дис... канд. биол. наук. Ставрополь: Ставропольский государственный университет, 2005. 25 с.
25. Практикум по агроэкологии: Учебное пособие // Под ред. Орловой Е. Е. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2011. 148 с.
26. Портал биоресурсных коллекций. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.biores.cytogen.ru/> (дата обращения 15.03.2021).
27. Терещенко Н. Н., Акимова Е. Е., Минаева О. М. Современные методы оценки микробиологических свойств и экологического состояния почв. Справочник. Томск: изд-во ТГУ, 2017. 147 с.
28. Кабиров Р. Р., Хазипова Р. Х. Альгологический метод оценки токсичности ПАВ // *Биоиндикация и биомониторинг*. М.: Наука, 1991. С. 282–285.

References

1. Li S., Chen G. Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: preparation, performance, and socioeconomic impacts // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 251. Art. No. 119669. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119669.
2. Global Hydrogels Market Report 2022: Market to Reach \$16.7 Billion by 2027 - Innovations Expand Addressable Market for Hydrogels. [Electronic resource]. Access point: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.18734008-62976392-

f172fee874722d776562/https/www.yahoo.com /now/global-hydrogels-market-report-2022-122300669.html (reference's date 30.05.2022).

3. Behera S., Mahanwar P. Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2019. No. 59 (6). P. 1–16. DOI: 10.1080/25740881.2019.1647239.
4. Rabadanov R. G. Absorption properties of highly swelling polymeric hydrogels used in agriculture // Agrarnaya Rossiya (Agrarian Russia). 2017. No. 6. P. 2–7. DOI: 10.30906/1999-5636-2017-6-15-18.
5. Rizwan M., Gilani S. R., Durani A. I., Naseem S. Materials diversity of hydrogel: synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field // Journal of Advanced Research. 2021. No. 33. P. 15–40. DOI: 10.1016/j.jare.2021.03.007.
6. Naumov P. V., Shcherbakova L. F., Okolelova A. A. Optimization of soil moisture availability using polymer hydrogels // Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2011. No. 4 (24). P. 77–81.
7. Revenko V. Yu., Agafonov O. M. The use of hydrogels in crop production // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2018. No. 11–2. P. 59–65. DOI: 10.24411/2500-1000-2018-10193.
8. Beybulatov M. R., Yaroshchuk I. E. The effect of applying adsorbents during the establishment of a vineyard // Viticulture and Winemaking. 2012. Vol. XLII. P. 31–33.
9. Starovoitov V. I., Starovoitova O. A., Manokhina A. A. Cultivation of potatoes using moisture saving polymers // Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin”. 2015. No. 1. P. 15–18.
10. Guilherme M. R., Aouada F. A., Fajardo A. R., Martins A. F., Paulino A. T., Davi M. F.T., 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. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017.
11. Mehrotra T., Zaman M. N., Prasad B. B., Shukla A., Aggarwal S., Singh R. Rapid immobilization of viable *Bacillus pseudomycoloides* in polyvinyl alcohol/glutaraldehyde hydrogel for biological treatment of municipal wastewater // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. Iss. 9. P. 9167–9180. DOI: 10.1007/s11356-019-07296-z.
12. Ahmed E.M. Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review // Journal of Advanced Research. 2015. Vol. 6(2). P. 105–121. DOI: 10.1016/j.jare.2013.07.006.
13. Mignon A., De Belie N., Dubruel P., Van Vlierberghe S. Superabsorbent polymers: a review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and ‘smart’ derivatives // European Polymer Journal. 2019. Vol. 117. P. 165–178. DOI: 10.1016/J.EURPOLYJM.2019.04.054.
14. Kuznetsov A. Yu. Influence of polymer reclamation on the properties of leached chernozem, greenhouse soil and crop yields. Author’s abstract diss. ... Cand. Sc. (Agr.). Penza: Penza State Agricultural Academy, 2003. 25 p.
15. Revenko V. Yu. Zaitsev R. N. Change of moisture availability of agricultural crops in the eastern zone of Krasnodar Krai // Actual problems of humanities and natural sciences. 2016. No. 5 (88). P. 6. P. 9–12.
16. Danilova T. N. Influence of hydrogels on indicators of the harvest structure of grain crops under model soil dry “dryer” and in field conditions // Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2021. No. 3. (64). P. 31–39. DOI: 10.24412/2078-1318-2021-3-31-39.
17. Maksimova Yu. G., Maksimov A. Yu., Demakov V. A., Budnikov V. I. The influence of polyacrylamide gels on soil microflora // Bulletin of Perm University. Biology. 2010. No. 1 (1). P. 45–49.
18. Snigdha S., Kalarikkal N., Thomas S., Radhakrishnan E. K. Laponite® clay/poly(ethylene oxide) gel beads for delivery of plant growth-promoting rhizobacteria // Bulletin of Materials Science. 2021. Vol. 44. Iss. 2. DOI:10.1007/s12034-021-02383-9.
19. Kulagina E.M., Yusupova R.I., Potapova M.A. Study of modified polyacrylamide for toxicity and mutagenic activity // Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18. No. 14. P. 42–44.
20. Maksimova Yu. G., Gorshkova A. A., Demakov V. A. Polyacrylamide biodegradation by soil microflora and bacteria containing amidase // Bulletin of Perm University. Biology. 2017. Iss. 2. P. 200–204.
21. Tepper E. Z., Shilnikova V. K., Pereverzeva G. I. Practical work on microbiology. Moscow: Drofa, 2005. 254 p.
22. Experimental soil microbiology: monograph // Sci. ed. Volkogon V. V. Kiev: Agrarna nauka, 2010. 446 p.
23. Prusachenko A.V., Protsenko E.P., Mironov S.Yu., Kleeva N.A., Grinenko I.A., Galyas A.V. Phytotoxicity of the urban soil toxicity // Ecology of Urban Areas. 2010. No. 2. P. 105–109.
24. Bagdasaryan A. S. Biotesting of soils of technogenic zones of urban territories using plant organisms. Author’s abstract diss. ... Cand. Sc. (Biol.). Stavropol: Stavropol State University, 2005. 25 p.

25. Workshop on agroecology: Textbook / Edited by Orlova E.E. St. Petersburg: St. Petersburg. University Publ., 2011. 148 p.
26. Portal of bioresource collections. [Electronic Resource]. Assess point: <http://www.biores.cytogen.ru/> (reference's date 15.03.2021).
27. Tereshchenko N. N., Akimova E. E., Minaeva O. M. Modern methods of assessment of microbiological properties and ecological state of soils. Guide. Tomsk: Tomsk State University Publ., 2017. 147 p.
28. Kabirov R. R., Khazipova R. Kh. Algological method for assessing the toxicity of surfactants // Bioindication and biomonitoring. Moscow: Nauka, 1991. P. 282–285.

UDC 579.64:631.81

Didovich S. V., Kryzhko A. V., Smaglyi N. V.

ANALYSIS OF BIOTOTOXICITY OF POLYMER HYDROGELS FOR AGRICULTURAL PURPOSES

Summary. *In recent years, hydrogel agriculture and crop production have been actively developing worldwide in areas of unstable and insufficient moisture supply. The use of superabsorbents – innovative developments of for agricultural purposes requires comprehensive study of their environmental safety and efficiency. The aim of our research was to evaluate the innovative polymer hydrogel superabsorbents' toxicity by biotesting on agricultural plants and microorganisms for further using in crop cultivation technology. Innovative hydrogel superabsorbents based on acrylic acid, potassium acrylate and acrylamide were used in experiments. We carried out the biodiagnostics of hydrogel toxicity on *Pisum sativum* L. and *Triticum aestivum* L. and assessed their impact on sowing qualities of seeds (uniform emergence, germination energy, emergence rate, germination ability (viability) and seedlings biomass), studied their influence on *Azotobacter vinelandii* and *Rhizobium leguminosarum* growth and compared them to production hydrogels using biotesting and microbiological methods. Synthetic polymer hydrophilic hydrogels based on sodium and potassium polyacrylates, acrylic acid and acrylamide contain neither nitrogen-fixing, phosphate mobilizing, ammonifying, nitrifying, cellulolytic or oligotrophic microorganisms nor microscopic fungi. Experimental synthetic polymer hydrogels were characterized by a low index of phytotoxicity (ITF) during biotest on the sowing qualities of pea seeds (ITF 0.74–0.79), did not significantly affect the sowing qualities of wheat seeds (ITF 0.93–0.94) and were at the level of industrial superabsorbents based on potassium and sodium polyacrylates (ITF 0.74–0.76 and 0.94–0.97). Experimental synthetic polymer hydrogels had a low toxicity index (IT) for *Azotobacter vinelandii* (IT 0.74–0.76) in comparison with the high toxicity of synthetic hydrogels based on sodium and potassium acrylates (IT 0.31–0.42). However, experimental hydrogels were highly toxic to *Rhizobium leguminosarum* (IT 0.14–0.30) when compared to industrial superabsorbents (IT 0.54–0.71).*

Keywords: *hydrogels, toxicity index, biotest, seed sowing qualities, *Pisum sativum* L., *Triticum aestivum* L., *Azotobacter vinelandii*, *Rhizobium leguminosarum*.*

Дидович Светлана Витальевна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Биоресурсный потенциал приморских территорий», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»; 299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33; ведущий научный сотрудник лаборатории растительно-микробного взаимодействия, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: svalex.68@mail.ru.

Крыжко Анастасия Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Биоресурсный потенциал приморских территорий», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»; 299053, Россия, г.

Севастополь, ул. Университетская, 33; ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики, протеомики и биоинформатики в сельском хозяйстве, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: kryzhko_a@niishk.ru.

Смаглий Наталья Владимировна, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Биоресурсный потенциал приморских территорий», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»; 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33; лаборант-исследователь лаборатории молекулярной генетики, протеомики и биоинформатики в сельском хозяйстве, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453. Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: scarletsun7991@mail.ru.

Didovich Svetlana Vital'evna, Cand. Sc. (Agr.), senior researcher of the Research laboratory “Bioresource potential of the primorsky territories”, FSAEI HE “Sevastopol State University”; 33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia; leading researcher of the Laboratory of plant-microbe interaction, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: sv-alex.68@mail.ru.

Kryzhko Anastasiia Vladimirovna, Cand. Sc. (Agr.), senior researcher of the Research laboratory “Bioresource potential of the primorsky territories”, FSAEI HE “Sevastopol State University”; 33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia; leading researcher of Laboratory of molecular genetics, proteomics and bioinformatics in agriculture, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: kryzhko_a@niishk.ru.

Smagliy Natalia Nikolaevna, junior researcher of the Research laboratory “Bioresource potential of the primorsky territories”, FSAEI HE “Sevastopol State University”; 33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia; laboratory assistant of Laboratory of molecular genetics, proteomics and bioinformatics in agriculture, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: scarletsun7991@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 10.06.2022.

Дата принятия к печати – 11.07.2022.